



UNIVERSIDADE FEDERAL DA PARAÍBA
CENTRO DE CIÊNCIAS EXATAS E DA NATUREZA
DEPARTAMENTO DE GEOCIÊNCIAS
CURSO DE GEOGRAFIA

PROCESSOS HIDROSEDIMENTOLÓGICOS NA BACIA DO RIO TAPEROÁ

JOSÉ CARLOS DANTAS

João Pessoa - PB
Março de 2016

JOSÉ CARLOS DANTAS

PROCESSOS HIDROSSEDIMENTOLÓGICOS NA BACIA DO RIO TAPEROÁ

Monografia apresentada ao departamento de Geociências do Centro de Ciências Exatas e da Natureza da Universidade Federal da Paraíba, Campus I, em cumprimento às exigências para obtenção do grau de Bacharel em Geografia.

Orientador:
Prof. Dr. Richarde Marques da Silva

João Pessoa - PB
Março de 2016

D192p Dantas, José Carlos.
 Processo hidrossedimentológicos na Bacia do Rio Taperoá / José
 Carlos Dantas. – João Pessoa, PB, 2016.
 83p. : il. color.

 Monografia (Bacharelado em Geografia) – Universidade Federal da
 Paraíba.
 Orientador: Prof. Dr. Richarde Marques da Silva.

 1. Rio Taperoá. 2. Modelagem hidrossedimentológica. 3. Modelo
 SWAT. 4. Produção de sedimentos. I. Título.

BS-CCEN

CDU 556.18(043.2)

JOSÉ CARLOS DANTAS

PROCESSOS HIDROSSEDIMENTOLÓGICOS NA BACIA DO RIO TAPEROÁ

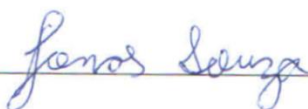
Esta Monografia foi julgada e aprovada para a obtenção do Título de Bacharel em Geografia, Universidade Federal da Paraíba, como parte dos requisitos para a sua conclusão.

João Pessoa, 03 de março de 2016.


BANCA EXAMINADORA



Orientador: Prof. Dr. Richarde Marques da Silva



Prof. Dr. Jonas Otaviano Praça de Souza



Prof. Dr. Celso Augusto Guimarães Santos

Dedico este trabalho a todos que não tiveram a oportunidade de ter acesso ao ensino superior e àqueles que através de mim e de meus companheiros poderão, um dia, ter a oportunidade de estudar em uma universidade pública.

AGRADECIMENTOS

Hoje, depois de todos esses anos, pude perceber que ninguém, absolutamente ninguém, faz nada sem a ajuda de outra pessoa. Esse trabalho é a minha constatação de que essa afirmação é verdadeira. Somos seres sociais e, enquanto tais, nos reproduzimos através de relações sociais, relações entre pessoas, as mais diversas que se possa imaginar. Portanto, esses agradecimentos são o registro de todos aqueles que contribuíram para que eu chegasse até aqui; de todos aqueles que contribuíram para eu ser quem sou hoje.

Quero agradecer, de início, ao Ser responsável pela criação de quase todas as coisas que existem. Sim, quase todas, pois existem inúmeras coisas cuja criação é de nossa responsabilidade. No entanto, a perfeição com que esse ser moldou a menor partícula de um solo e, ao mesmo tempo, um grande corpo rochoso como a Pedra do Tendó me impressiona cada dia mais. Sim, eu creio nesse ser. E o motivo por crer nele é o motivo pelo qual acredito que um dia, o mundo será um lugar em que ninguém precise explorar ninguém para viver melhor. Espero que eu possa contribuir para que um dia esse mundo exista.

Agradeço a minha família, a qual é a responsável direta por eu estar aqui hoje. Obrigado por terem me ensinado coisas que eu levo comigo todos os dias. Minha mãe e meu pai, Lucenira e Iranildo; meu irmão Vinicius; minhas avós, Benedita e Terezinha e meu avô Manoelzinho; minhas tias e meus tios; minhas madrinhas e padrinhos, tanto os de batismo quanto os de fogueira. Em especial agradeço ao meu avô Lula (*in memoriam*), com quem aprendi a ter paciência e a gostar de ajudar outras pessoas. Infelizmente só depois que você se foi é que eu vi o quanto me parecia com você. Mesmo com todas as dificuldades vocês sempre estiveram do meu lado e sempre me ajudaram para que eu continuasse aqui.

Também agradeço a minha família pessoense, que me acolheu quando eu cheguei a João Pessoa. À Teté, Bianca e Neide, por gentilmente terem aberto as portas da sua casa para um menino do interior que nunca tinha saído de casa. O que vocês fizeram por mim sempre será lembrado enquanto eu viver. À Ideildo, Terezinha, Pablo e Italo por terem me aguentado nos finais de semana (risos), e por terem me proporcionado momentos felizes ao longo desses anos.

Agradeço às companheiras e companheiros freimartinenses, que acreditaram em mim e que me deram força para que eu pudesse seguir em frente. Agradeço também as pessoas da minha cidade que achavam que esse curso não ia dar em nada, pois isso também foi motivo para que eu pudesse provar o contrário. Hoje eu posso mostrar que vocês estavam errados.

Agradeço às professoras e aos professores do curso de Geografia da UFPB que foram responsáveis diretamente pela minha formação acadêmica, política e ideológica: Max Furrier, Ana Madruga, Eduardo Viana, Maria Franco, Pedro Vianna, Antônio Gomes, Marcelo Moura, Sinval Almeida, Marco Mitidiero, Magno Erasto, Araci Farias, Utaiguara Borges, Bartolomeu Souza, Jonas Souza, Doralice Sátyro, Christianne Moura, Fátima Rodrigues e José Paulo, e Celso Augusto do Departamento de Engenharia Civil da UFPB. Hoje posso afirmar com total certeza e tranquilidade: graças a vocês temos um dos melhores cursos de Geografia desse país. Foi uma honra ter sido aluno e ter tido a oportunidade de trocar experiências e ideias com vocês todos esses anos. Podem ter certeza de que esse trabalho tem um pouco de cada um de vocês.

Quero agradecer a dois professores em especial; meus dois orientadores: Richarde Marques e Emilia Moreira. Sim, eu tive a sorte de ter dois orientadores ao longo do curso. Agradeço ao professor Richarde por ter me dado a oportunidade de participar do grupo pesquisa do LEPPAN e do Pibic/CNPq e por ter acreditado em mim todo esse tempo. Também agradeço a professora Emilia por me incluir no GETEC e por ter apostado em mim quando eu ainda estava engatinhando na universidade. Com vocês aprendi a ter seriedade na pesquisa, a ter humildade, ser confiante, ajudar meus companheiros e a entender o que é ser Geógrafo. Acho que a minha gratidão por vocês não pode ser expressa em palavras. Espero um dia poder retribuir a altura o que vocês fizeram por mim.

Agradeço às minhas companheiras e aos meus companheiros de turma pelos quatro anos de convivência. Em especial aos que desde o início do curso estiveram comigo: Dalyson, que despertou em mim o gosto pela pesquisa; Joseilson, por ter me acolhido quando eu precisei; e Thyago, que sempre compartilhou ideias progressistas comigo. Tenham certeza de que sempre seremos a turma 2012.1. E espero que consigamos atingir todos os nossos objetivos.

Agradeço, também, a Cecília e Mariá por estarem juntas comigo nessa reta final de elaboração deste trabalho. Conseguimos construir uma boa relação nesses últimos meses. Espero que nossa amizade permaneça durante e após essa nova etapa em nossas vidas.

Às companheiras e aos companheiros do LEPPAN por terem me acolhido no laboratório e por me ensinarem coisas que não aprendi em nenhum outro lugar. Esses três anos de trabalho me mostraram o quão vocês são atenciosos e como nos preocupamos uns com os outros. No LEPPAN eu me sinto em casa. Obrigado por tudo.

Agradeço às demais companheiras e companheiros da Geografia da UFPB por todos os momentos, felizes e tristes, que passamos em todos esses anos. Aos companheiros do GETEC, CEGE, LEGAT, GEAFS, LEGAM e demais grupos de pesquisa da nossa

Geografia, meu muito obrigado. Desculpa não poder citar o nome de todos; se fosse falar de todos vocês esses agradecimentos iriam ter umas quinze páginas (risos). Mas, vocês sabem quem são.

Também não poderia deixar de agradecer às companheiras e aos companheiros prudentinos pelo tempo que passei lá. Mesmo sendo pouco tempo pude ter ótimas experiências durante o Projeto Casadinho, tanto acadêmicas quanto políticas, ideológicas e pessoais. Agradeço a todas e todos do CEGET, NERA, BioGeoS e demais grupos com quem interagi. Também não posso deixar de agradecer a todas e todos da moradia pelo acolhimento. Foi uma experiência incrível o tempo que dividi com vocês. Sempre vou lembrar do B3 como uma das minhas casas.

Agradeço a todas e todos da Geografia que conheci durante o curso. Vocês me fizeram ver que precisamos mudar a realidade vista no mundo hoje e que eu também posso ser um agente de transformação da sociedade. Um dia conseguiremos tornar o mundo um lugar melhor para se viver, mesmo que não estejamos mais aqui para ver isso.

Por fim, quero dizer que este trabalho é a prova de que a meritocracia não existe; que eu sou a prova de que a meritocracia não existe. Se cheguei onde cheguei hoje não foi só por que eu me dediquei, ainda que eu tenha me dedicado muito. Se cheguei onde cheguei hoje foi por que eu tive oportunidades: tive a oportunidade de estudar em escola pública; tive a oportunidade de estudar em um cursinho público; tive a oportunidade de estudar em uma universidade pública; tive a oportunidade de ser bolsista durante três anos. Muitos talvez não puderam chegar onde eu cheguei não por que não se esforçaram demais, mas por que não tiveram oportunidades. Espero que eu possa contribuir para que outras pessoas tenham a oportunidade de chegar onde eu cheguei. É o mínimo que posso fazer por elas.

À todas e todos, o meu mais profundo obrigado!

“Esse é o caos, esse é o mundo que você convive hoje:
Século XXI. Com a geração do século XXI. O que é que você vai fazer pra mudar?
Cruzar os braços e reclamar? Ou você vai ser a revolução em pessoa?
Acredite em você, rapaz!”

(A Fórmula Mágica da Paz - Mano Brown)

RESUMO

O estudo dos processos erosivos gerados pela ação da água pode ser denominado de Hidrossedimentologia. Este trabalho teve como objetivo estimar a produção de sedimentos na bacia do Rio Taperoá, localizada na região semiárida do Estado da Paraíba, utilizando o modelo *Soil and Water Assessment Tool* (SWAT). Neste trabalho foram utilizados dados de precipitação, temperatura e umidade para o período de 1970 a 1990, além de mapas dos tipos de solos, uso e ocupação do solo e modelo de elevação digital. A série de dados foi dividida em duas partes a fim de se fazer uma comparação da influência do uso do solo com o comportamento da vazão e da produção de sedimentos na bacia. Os períodos selecionados para a modelagem foram: a) 1970–1980; e b) 1981–1990. Valores simulados pelo modelo SWAT foram comparados com dados de vazão medidos e de produção de sedimentos estimados. O modelo foi calibrado e validado usando dados mensais de vazão para o posto fluviométrico Poço de Pedras. O modelo foi calibrado através do método de autocalibração SUFI-2 com o intuito de obter melhores ajustes para a modelagem. Os índices estatísticos (Nash e R^2) foram usados para fazer uma avaliação do desempenho do modelo na estimativa da vazão e da produção de sedimentos na bacia. Os resultados mostram um bom ajuste, com vazão média observada de 6,56 m³/s e vazão média simulada de 8,39 m³/s entre 1970 e 1980 e vazão média observada de 3,48 m³/s e vazão média simulada de 3,67 m³/s entre 1981 e 1990. Os resultados mostram que a mudança de cobertura do solo afetou a hidrologia da bacia, diminuindo a produção de sedimentos (1,33 t/ha/ano em 1970–1980 para 0,08 t/ha/ano em 1981–1990).

Palavras-chave: Rio Taperoá; modelagem hidrossedimentológica; modelo SWAT; produção de sedimentos.

ABSTRACT

The study of erosion processes generated by water action can be called runoff-erosion study. This work aims to analyze the water and sediment yield at the Taperoá River basin, located in the semiarid region of Paraíba State, based on the runoff-erosion model named Soil and Water Assessment Tool (SWAT). In order to develop this study, rainfall, temperature and humidity data from 1970 to 1990, soil map, land cover map and digital elevation model with spatial resolution of 30 m were used. The data set was divided into two parts in order to compare the influence of land use with the behavior of runoff and sediment yield in the basin. The periods selected for modeling were: a) 1970–1980; and b) 1981–1990. The model was calibrated and validated by comparing simulated mean monthly runoff with observed long-term mean monthly runoff at Poço de Pedras gauge. The model was calibrated using the auto-calibration method SUFI-2 in order to obtain optimal settings for modeling. Statistical indices (Nash and R^2) were used to evaluate the model performance to estimate the runoff and sediment yield in the basin. The results showed the effectiveness of the model for the analysis of runoff process with average observed runoff = 6.56 m³/s and average simulated runoff = 8.39 m³/s between 1970–1980, and average observed runoff = 3.48 m³/s and average simulated runoff = 3.67 m³/s between 1981–1990. The results show that the land cover change affected the basin hydrology, decreasing the sediment yield (1.33 t/ha/yr in 1970–1980 to 0.08 t/ha/yr in 1981–1990).

Keywords: Taperoá River; runoff-erosion modeling; SWAT model; sediment yield.

LISTA DE FIGURAS

| | |
|---|----|
| Figura 1 – Localização da bacia hidrográfica do Rio Taperoá..... | 21 |
| Figura 2 – Comportamento da precipitação média mensal na bacia..... | 22 |
| Figura 3 – Síntese do funcionamento do ciclo hidrossedimentológico..... | 25 |
| Figura 4 – Discretização da bacia do Rio Taperoá em sub-bacias e geração da rede hidrográfica..... | 40 |
| Figura 5 – Distribuição espacial dos tipos de solo existentes na bacia do Rio Taperoá | 44 |
| Figura 6 – Vista do <i>software Soil Water Characteristics Hydraulic Properties Calculator</i> . | 46 |
| Figura 7 – Rede de drenagem e classes de declividade definidas para a bacia do Rio Taperoá | 47 |
| Figura 8 – Fluxograma das etapas realizadas na modelagem..... | 54 |
| Figura 9 – Classificação do uso do solo na bacia do Rio Taperoá para: (a) 1º período e (b) 2º período..... | 56 |
| Figura 10 – Vista da paisagem típica da região do Cariri Paraibano, no município de Cabaceiras-PB | 58 |
| Figura 11 – Hidrograma e ietograma observados para a bacia do Rio Taperoá entre 1970 e 1990 | 59 |
| Figura 12 – Comportamento das vazões médias observada e simulada para a bacia do Rio Taperoá..... | 60 |
| Figura 13 – Distribuição espacial da vazão estimada na bacia do Rio Taperoá, para: (a) 1º período e (b) 2º período | 63 |
| Figura 14 – Resultados da sensibilidade dos parâmetros utilizando a função p-value, para: (a) 1º período e (b) 2º período..... | 65 |
| Figura 15 – Comportamento da produção de sedimentos anual estimada na bacia do Rio Taperoá e sua relação com a precipitação média anual observada na bacia | 66 |
| Figura 16 – Distribuição espacial da produção de sedimentos nas sub-bacias do Rio Taperoá, para: (a) 1º período e (b) 2º período | 68 |
| Figura 17 – Exemplo de plantio em curvas de nível em uma propriedade rural no município de Cabaceiras-PB, localizada na bacia do Rio Taperoá | 71 |

LISTA DE TABELAS

| | |
|--|----|
| Tabela 1 – Informações sobre as imagens utilizadas na classificação do uso do solo na bacia..... | 42 |
| Tabela 2 – Classes de uso do solo identificadas na bacia e a associação com as classes de uso do solo do banco de dados do SWAT | 43 |
| Tabela 3 – Tipos e informações básicas dos solos existentes na bacia do Rio Taperoá..... | 44 |
| Tabela 4 – Descrição dos perfis utilizados na modelagem..... | 45 |
| Tabela 5 – Informações dos postos pluviométricos utilizados neste estudo | 48 |
| Tabela 6 – Valores das médias mensais para os parâmetros climatológicos utilizados na estimativa dos valores diários neste estudo: relacionados à temperatura (TMPMX; TMPMN; TMPSTDMX; TMPSTDMN), precipitação (PCPMM; PCPSTD; PCPSKW; PR_W1; PR_W2; PCPD, RAINHHMX), radiação solar (SOLARAV), velocidade do vento (WNDV) e umidade relativa do ar (DEWPT) | 50 |
| Tabela 7 – Informações do posto fluviométrico utilizado neste estudo | 51 |
| Tabela 8 – Parâmetros relacionados ao escoamento superficial utilizados na calibração do modelo SWAT..... | 53 |
| Tabela 9 – Classes de uso do solo e respectivas áreas para os períodos de 1970 a 1980 e 1981 a 1990 na bacia do Rio Taperoá | 55 |
| Tabela 10 – Principais resultados encontrados na modelagem da vazão | 60 |
| Tabela 11 – Valores calibrados dos parâmetros utilizados na calibração do SWAT | 64 |

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

ARS – *Agricultural Research Service*

CREAMS – *Chemicals, Runoff and Erosion for Agricultural Management Systems*

EPIC – *Erosion Productivity Impact Calculator*

ESRI – *Environmental Systems Research Institute*

FAO – *Food and Agriculture Organization of the United Nations*

GLEAMS – *Groundwater Loading Effects of Agricultural Management Systems*

HRU – *Hidrologic Response Units*

INPE – *Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais*

MDE – *Modelo Digital de Elevação*

MODIS – *Moderate Resolution Imaging Spectroradiometer*

MUSLE – *Modified Universal Soil Loss Equation*

RUSLE – *Revised Universal Soil Loss Equation*

SCS – *Soil Conservation Service*

SIG – *Sistemas de Informações Geográficas*

SRTM – *Shuttle Radar Topography Mission*

SWAT – *Soil and Water Assessment Tool*

SWRRB – *Simulator for Water Resources in Rural Basins*

USDA – *United States Department of Agricultural*

USLE – *Universal Soil Loss Equation*

WEPP – *Water Erosion Prediction Project*

SUMÁRIO

| | | |
|-------|--|----|
| 1 | INTRODUÇÃO | 17 |
| 1.1 | Justificativa | 18 |
| 1.2 | Objetivos | 19 |
| 1.2.1 | Objetivo Geral | 19 |
| 1.2.2 | Objetivos específicos | 19 |
| 2 | CARACTERÍSTICAS GEOGRÁFICAS DA BACIA DO RIO TAPEROÁ | 21 |
| 3 | FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA | 24 |
| 3.1 | Processos hidrossedimentológicos | 24 |
| 3.2 | O fenômeno da erosão | 25 |
| 3.3 | Práticas conservacionistas | 28 |
| 3.3.1 | Práticas de caráter edáfico | 28 |
| 3.3.2 | Práticas de caráter mecânico | 29 |
| 3.3.3 | Práticas de caráter vegetativo | 29 |
| 3.4 | Modelagem hidrossedimentológica | 30 |
| 3.4.1 | Breves comentários sobre a evolução da modelagem hidrossedimentológica | 33 |
| 3.4.2 | Aplicações de modelagem hidrossedimentológica no Brasil | 34 |
| 3.4.3 | Aplicações de modelagem hidrossedimentológica na Geografia brasileira | 35 |
| 4 | PROCEDIMENTOS METODOLÓGICOS | 37 |
| 4.1 | Breve descrição do modelo SWAT | 37 |
| 4.2 | Construção do banco de dados do modelo e dados utilizados na modelagem | 39 |
| 4.2.1 | Discretização da bacia hidrográfica | 40 |
| 4.2.2 | Geração das unidades de resposta hidrológica | 41 |
| 4.2.3 | Inserção dos dados climáticos | 48 |
| 4.3 | Análise de desempenho do modelo | 50 |
| 4.4 | Calibração do SWAT | 52 |
| 4.5 | Visita de campo | 54 |
| 5 | RESULTADOS E DISCUSSÃO | 55 |
| 5.1 | Mudanças no uso do solo da bacia do Rio Taperoá | 55 |
| 5.2 | Análise do comportamento da vazão | 58 |
| 5.2.1 | Análise de sensibilidade dos parâmetros utilizados na modelagem | 64 |
| 5.3 | Análise da simulação da produção de sedimentos | 66 |
| 5.4 | Práticas de conservação do solo na bacia do Rio Taperoá | 69 |

| | | |
|---|----------------------------|----|
| 6 | CONSIDERAÇÕES FINAIS | 73 |
| 7 | REFERÊNCIAS | 75 |
| | APÊNDICES | 81 |

1 INTRODUÇÃO

Os processos de erosão dos solos causam sérios danos à natureza e prejudicam a qualidade das águas com o transporte de poluentes nos sedimentos, além de influenciar no assoreamento de rios e reservatórios. Estes processos são decorrentes da ação dos agentes climáticos, como chuva e vento, que ao incidirem sobre o terreno podem ocasionar impactos de diversas magnitudes, o que depende das características geomorfológicas, pedológicas, geológicas e da cobertura superficial que compõem a paisagem (GUERRA et al., 2008).

Na região semiárida do Nordeste do Brasil, o comportamento da erosão e do escoamento superficial, além de estar associado ao uso do solo, está intimamente relacionado com a dinâmica das precipitações que ocorrem durante o ano: uma estação chuvosa concentrada em apenas três meses do ano com notáveis variações espaciais e temporais, com totais pluviométricos anuais abaixo de 600 mm e recorrentes períodos de estiagem. Além disso, é comum a ocorrência de chuvas torrenciais na região, potencializando os efeitos erosivos (SRINIVASAN e PAIVA, 2009).

Essa característica climática tem rebatimento nos aspectos geomorfológicos, pedológicos, de vegetação e até sociais. Isso faz do semiárido brasileiro um ambiente de grande complexidade tanto do ponto de vista natural quanto social (SOUZA, 2008), sobretudo, no que tange a dinâmica dos processos hidrossedimentológicos, que são influenciados diretamente pelos solos da região.

Os solos da região semiárida normalmente possuem pequena profundidade devido ao fato da presença do embasamento cristalino, e por essa razão tendem a apresentar problemas na disponibilidade de material pedogenético com maior rapidez quando comparados com solos de regiões sedimentares (que apresentam maior grau de desenvolvimento) em decorrência da ação dos processos de formação do solo.

Por outro lado, no semiárido brasileiro, existe a preocupação com o armazenamento de água proveniente da chuva e do escoamento superficial nas bacias hidrográficas inseridas nessa região com o objetivo de satisfazer as necessidades humanas (uso doméstico, dessedentação animal, atividades agrícolas) nos períodos de estiagem. Contudo, também se faz necessário à busca por práticas de conservação do solo que venham a amenizar os efeitos promovidos pela erosão nos solos, como a perda de nutrientes, selagem da superfície do solo, surgimento de sulcos e ravinas, entre outros impactos responsáveis pela diminuição da qualidade dos solos.

Assim, a fim de compreender o comportamento dos processos hidrossedimentológicos no espaço, diversas pesquisas vêm sendo realizadas no Brasil, principalmente as que utilizam a modelagem hidrossedimentológica como metodologia de análise (BRESSIANI et al., 2015; SILVA, 2010; SILVA et al., 2011; SILVA et al., 2014; SOUZA et al., 2009). Esses estudos têm o propósito de quantificar as perdas de solo e auxiliar no gerenciamento dos recursos hídricos de bacias, mediante técnicas de geoprocessamento, Sensoriamento Remoto e de Sistemas de Informações Geográficas.

É de se destacar o papel dos Sistemas de Informações Geográficas – SIG na realização de pesquisas que se propõem compreender a dinâmica dos fenômenos físicos que ocorrem na superfície terrestre, pois possibilitam que sejam feitas análises espaço-temporais dos processos que se deseja investigar, facilitando a execução de estudos destinados a avaliar as modificações promovidas pelas atividades humanas no espaço (SILVA et al., 2003).

Nesse sentido, para o desenvolvimento deste trabalho, foi utilizado o modelo hidrossedimentológico *Soil and Water Assessment Tool* – SWAT, por este ser um modelo que permite estudar diversos processos físicos (como a erosão, o escoamento superficial e a composição de nutrientes no solo) em bacias de pequena, média e grande extensão, com diferentes dinâmicas e características naturais, como é o caso do semiárido brasileiro.

1.1 Justificativa

A realização de estudos que relacionem as alterações no uso do solo e a dinâmica hidrossedimentológica em bacias hidrográficas mediante a utilização de modelos matemáticos integrados a Sistemas de Informações Geográficas são importantes meios para se conhecer o comportamento hidrológico, sedimentológico e da paisagem em determinada área que se deseje estudar (SANTOS, 2015).

Os processos hidrossedimentológicos apresentam significância a partir do momento em que se pensa no desenvolvimento de atividades agrícolas, sobretudo, por influenciarem diretamente na qualidade do solo e da água do meio rural. A ocupação e o uso que se dará ao terreno são dependentes da dinâmica dos processos de erosão e de escoamento superficial que ocorrem no solo, afinal se torna uma tarefa difícil cultivar uma determinada cultura em uma vertente que sofre com intenso processo de perda de solo (CARVALHO, 2008; BERTONI e LOMBARDI NETO, 2010).

Em regiões semiáridas, os aspectos de clima e de solo tornam a dinâmica hidrossedimentológica ainda mais complexa (SRINIVASAN e PAIVA, 2009), necessitando

de uma análise mais cautelosa no momento da aplicação de uma determinada técnica de pesquisa, principalmente quando a área que se está investigando apresenta escassez de informações referentes aos elementos que a compõem, o que dificulta ainda mais a realização de estudos dessa natureza.

É nesse contexto que os modelos matemáticos aparecem como importantes ferramentas para a realização de pesquisas que estudam processos físicos, com destaque para aqueles que ocorrem na superfície terrestre, uma vez que são capazes de realizar simulações e projeções de acordo com a situação atual do ambiente em relação às modificações a que este está submetido, fortalecendo, assim, as ações voltadas ao planejamento ambiental e territorial de uma região.

Ressalta-se, ainda, a eficácia que estes modelos podem apresentar se forem utilizados conjuntamente a tecnologias associadas aos SIG, o que permite ter uma compreensão mais clara da realidade investigada a partir de análises espaço-temporais dos fenômenos e processos existentes no espaço e a sua relação com as intervenções promovidas pelas atividades humanas (SANTOS, 2015).

Portanto, pretende-se com este trabalho contribuir com os estudos relacionados à Hidrossedimentologia e às suas áreas relacionadas, tais como Agronomia, Engenharia Ambiental, Engenharia Civil, Geomorfologia, Hidrologia, entre outras. No entanto, espera-se que os resultados obtidos com esta pesquisa possam contribuir, principalmente, com futuros trabalhos que tenham relação com essa temática no âmbito da Geografia, por esta ser uma ciência capaz de enxergar a realidade de uma maneira integrada, onde o todo é maior do que a soma das partes.

1.2 Objetivos

1.2.1 Objetivo Geral

Avaliar as implicações das modificações no uso do solo sobre os processos hidrossedimentológicos na bacia do Rio Taperoá – PB.

1.2.2 Objetivos específicos

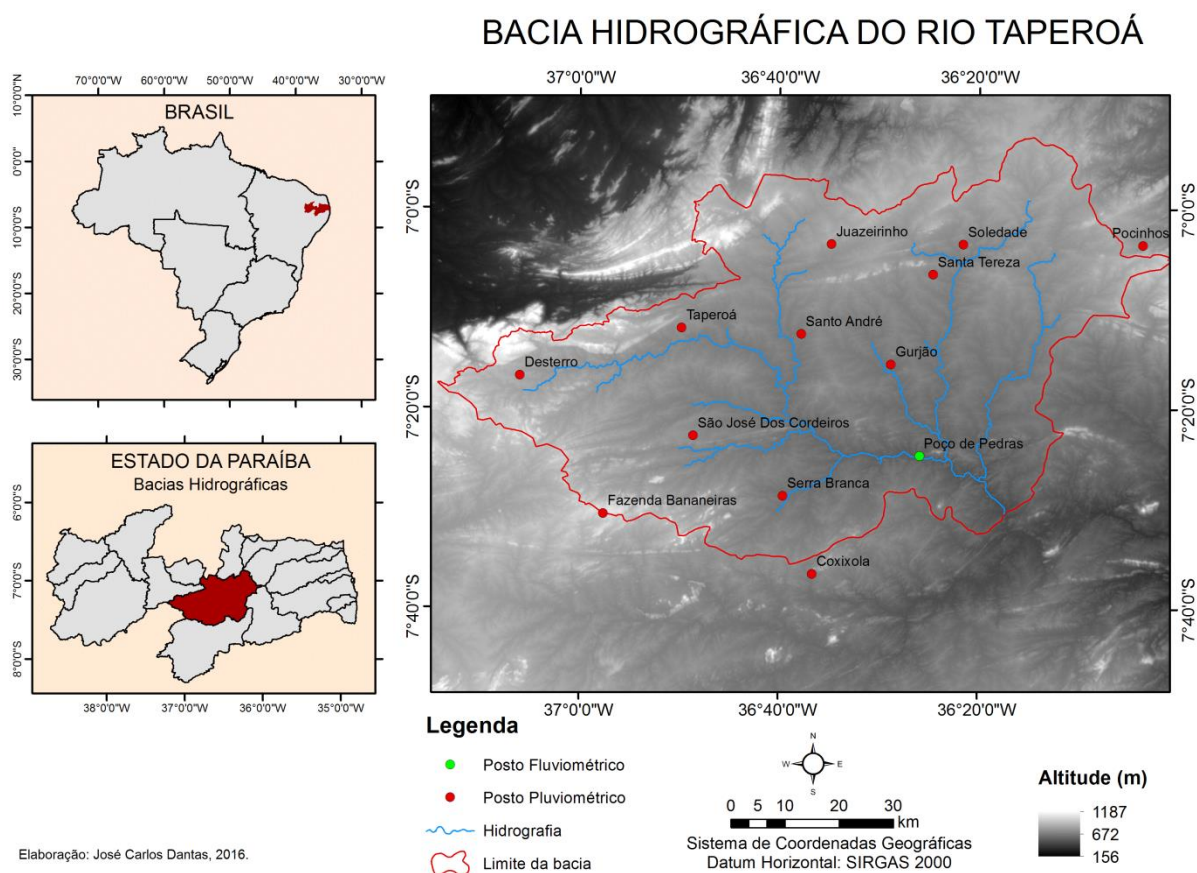
- a) Analisar as mudanças no uso do solo na bacia do Rio Taperoá nos períodos de 1970 a 1980 e de 1981 a 1990;
- b) Estimar a vazão e a produção de sedimentos na bacia do Rio Taperoá entre 1970 e 1990;

- c) Analisar a relação entre chuva, vazão e produção de sedimentos em escala mensal na bacia do Rio Taperoá entre 1970 e 1990;
- d) Discutir sobre práticas de conservação do solo que visem amenizar os danos provocados pela erosão na região da bacia do Rio Taperoá.

2 CARACTERÍSTICAS GEOGRÁFICAS DA BACIA DO RIO TAPEROÁ

A bacia hidrográfica do Rio Taperoá está localizada na Mesorregião da Borborema e inserida na região do Cariri Paraibano, situando-se entre as coordenadas 36°00'0"W, 37°20'0"W e 6°40'0"S, 7°40'0"S e abrangendo uma área de aproximadamente 5.660km² (Figura 1). A bacia compreende 23 municípios ao longo de sua extensão, possuindo uma população de 182.722 habitantes (IBGE, 2010).

Figura 1 – Localização da bacia hidrográfica do Rio Taperoá

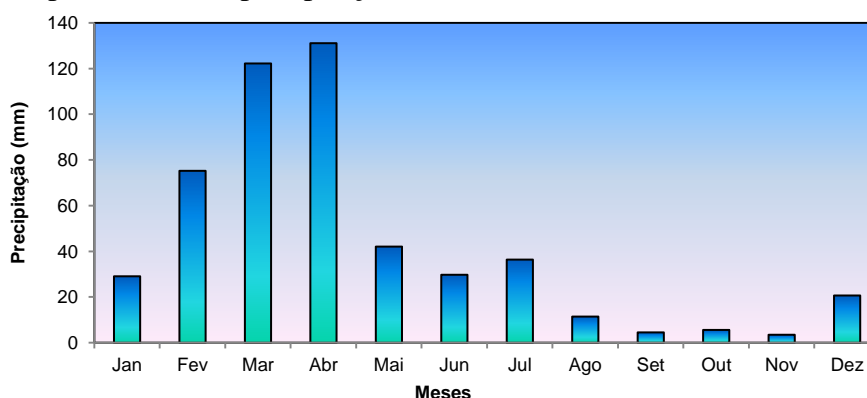


Fonte: Autor (2016).

Do ponto de vista geomorfológico a bacia do Alto Rio Paraíba encontra-se na chamada Superfície dos Cariris, de acordo com Carvalho (1982). Esta unidade geomorfológica se caracteriza pela presença de um relevo semi-colinoso com níveis altimétricos das cristas superiores a 500 m, onde a ocorrência de fraturas e linhas de falha promovidas pelo soerguimento do Maciço da Borborema condiciona à alteração do padrão de drenagem de dentrítico para retilíneo, expondo vales encaixados em algumas áreas e rios de caráter temporário em toda a unidade, sendo estes associados aos fatores climáticos que atuam na região.

As temperaturas médias mensais da região se mantêm em torno dos 30°C entre os meses de novembro e fevereiro, e nos meses de junho e julho a temperatura cai para 25°C, com taxas de insolação e evaporação médias anuais de 2800 horas/ano e 2000 mm/ano, respectivamente (NASCIMENTO e ALVES, 2008). As chuvas se distribuem na bacia de forma irregular durante o ano, sendo o período chuvoso representado pelos meses de fevereiro a abril (Figura 2), os quais concentram 64% da precipitação anual. A bacia registra em média 512 mm de precipitação total anual.

Figura 2 – Comportamento da precipitação média mensal na bacia



Fonte: ANA (2015).

A vegetação que compõe a região do Cariri Paraibano, assim como a maior parte do semiárido brasileiro, é a Caatinga, bioma caracterizado pela dominância de espécies caducifólias de natureza xerófila, com forte presença de plantas espinhosas e boa adaptação à seca (SOUZA, 2008). Este tipo de vegetação tem seu porte influenciado pela pedologia e relevo, variando, assim, de acordo com a diversidade das paisagens que abrangem o semiárido (SOUZA, 2008). A variabilidade topográfica e a distribuição dos tipos de solo influenciam na diferenciação do porte e das espécies presentes na vegetação (SOUZA et al., 2009).

Os solos do Cariri Paraibano “de modo geral, são sensíveis à erosão e ao fenômeno de salinização. (...) Em vertentes mais íngremes, os solos apresentam-se mais rasos com afloramentos” (CARVALHO, 1982, p. 49). Além disso, a estrutura fundiária da região é caracterizada pela pequena propriedade, que utiliza o solo de forma intensiva para a agricultura e para a atividade pecuária, potencializando os impactos gerados pela erosão e desertificação (SOUZA et al., 2009).

Souza et al. (2009) ao estudarem o processo de desertificação e seus impactos para a vegetação e para os solos do Cariri Paraibano afirmam que:

De forma geral, os solos encontrados nessa região são originários de rochas cristalinas, geralmente rasos, argilosos, pouco lixiviados, com predomínio de erosão

laminar e com fertilidade, embora variada, normalmente boa (SOUZA et al., 2009, p. 221).

Os referidos autores ainda alertam para o processo de salinização dos solos nessa região devido à utilização de técnicas de irrigação convencional para o plantio de determinadas culturas, pois em “amostras de solos coletadas nas várzeas de alguns rios da região (Neossolo Flúvico), onde a agricultura praticada para fins de subsistência não se utiliza de irrigação (...), a salinidade não se fez presente” (SOUZA et al., 2009, p. 225).

Nas áreas onde a agricultura é capaz de ser desenvolvida, principalmente nas áreas próximas aos corpos hídricos, ocorre o plantio de lavouras temporárias (feijão, milho, fava, batata doce, entre outros) e da palma-forrageira, que dividem espaço com a atividade pecuária, sobretudo a criação de caprinos (SOUZA, 2008).

No entanto, é a atividade pecuária, representada principalmente pela caprinocultura, uma importante maneira de obtenção de renda familiar no espaço agrário da região do Cariri. Por efeito das condições climáticas dificultarem uma produção agrícola regular durante o ano, a criação de caprinos destaca-se como uma prática mais rentável, do ponto de vista financeiro, para as famílias da região que vivem no campo. Esta atividade vem crescendo consideravelmente nas últimas décadas na região, chegando a 2006 com um total de mais de 208 mil cabeças, conforme os dados do Censo Agropecuário de 2006 organizados por Souza (2008) para a região.

Moreira e Targino (2011) também destacam a importância que a caprinocultura vem demonstrando ao longo dos anos na região do Cariri Paraibano em associação às políticas públicas promovidas pelo Estado, sobretudo nos incentivos à produção de leite de cabra por pequenos e médios produtores rurais articulando-os às usinas de beneficiamento de leite, contribuindo com o desenvolvimento regional.

Travassos (2012) ainda expõe que nos períodos de estiagem na região muitas famílias praticam o extrativismo como forma de complementar a sua renda, já que a maioria não consegue ter uma produção consistente vinda da agricultura nessas épocas por dependerem essencialmente dos fatores climáticos. Com isso, se veem obrigadas a buscar outros meios de garantirem suas rendas, ainda que tenham que degradar o ambiente para isso. A lenha produzida pelo desmatamento geralmente é comercializada em olarias e padarias locais.

Com base nos fatores expostos, busca-se entender como os processos hidrossedimentológicos são condicionados e influenciados por estes elementos através de uma abordagem integrada que relacione as propriedades de cada elemento com os fenômenos promovidos por eles.

3 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

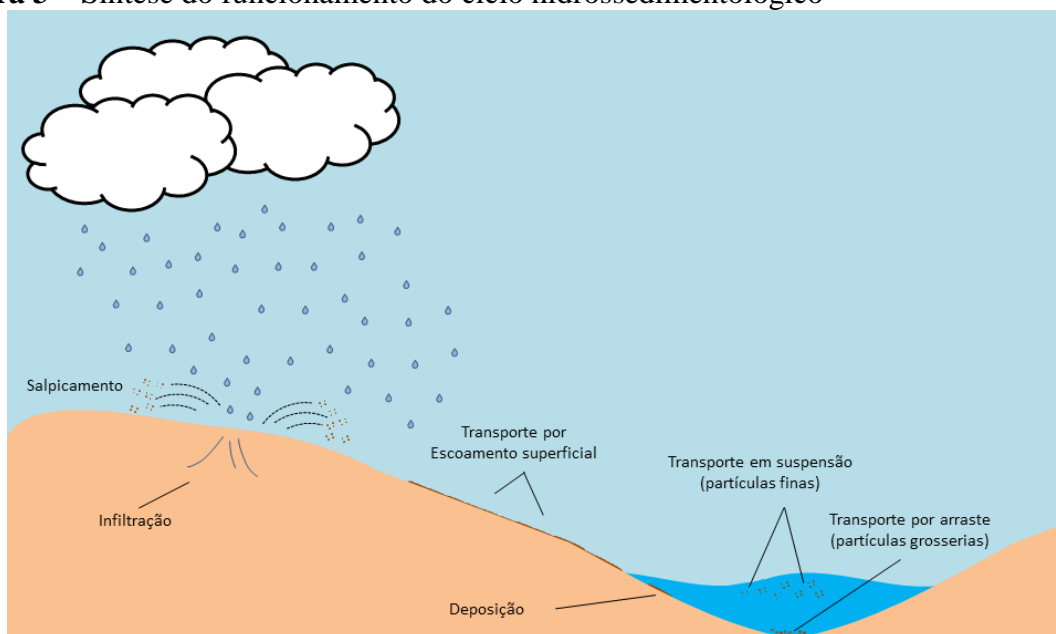
3.1 Processos hidrossedimentológicos

O ciclo hidrossedimentológico compreende a atuação conjunta dos processos hidrológicos e sedimentológicos na superfície terrestre. Ocorre concomitantemente ao ciclo hidrológico e corresponde aos fenômenos de desagregação, transporte e deposição de sedimentos a partir da ação da água ao longo de uma bacia hidrográfica (BORDAS e SEMMELMANN, 2014).

Na literatura brasileira consultada não foi possível encontrar um conceito bem definido para o termo Hidrossedimentologia. Contudo, notou-se, entre a bibliografia consultada (BORDAS e SEMMELMANN, 2001; CARVALHO, 2008; CARVALHO NETO, 2011; GELER ROFFE, 2012; MARCHIORO, 2008; SANTOS, 2015; SILVA et al., 2003; TESCH, 2015), que a Hidrossedimentologia é um campo da Hidrologia que estuda o ciclo hidrossedimentológico, sua dinâmica e o desenvolvimento dos processos que o constituem. Basicamente, o ciclo hidrossedimentológico é movido pelos processos de erosão e escoamento superficial, os quais serão o ponto de partida para a realização de análises sobre o funcionamento destes processos dentro desse ciclo.

O início do ciclo hidrossedimentológico se dá com o impacto das gotas de chuva no terreno, promovendo o desprendimento das partículas de solo e podendo ocasionar o transporte destas partículas por salpicamento a curta distância. Desagregado, o material é transportado ao longo do terreno por efeito do escoamento superficial até atingir o canal fluvial, onde passa a ser transportado pelo fluxo de água existente no canal. As partículas de solo podem ser transportadas no rio por suspensão (material mais fino) ou por arraste no leito do rio (material mais grosseiro). Quando a capacidade de transporte do fluxo de água é superada, seja por condições de vazão ou velocidade do fluxo, ocorre à deposição do sedimento, que passa a fazer parte da área de drenagem ou do leito do canal na bacia hidrográfica (CARVALHO NETO, 2011). Ressalta-se que as partículas podem ser transportadas novamente devido às condições do fluxo de água (velocidade do escoamento superficial ou vazão do rio) e à granulometria do material. A Figura 3 apresenta uma ilustração do funcionamento do ciclo hidrossedimentológico.

Figura 3 – Síntese do funcionamento do ciclo hidrossedimentológico



Fonte: Autor (2016).

É possível estudar os processos existentes no ciclo hidrossedimentológico através de diversas técnicas de pesquisa. Como exemplo, têm-se: monitoramento da vazão e de sólidos em suspensão em rios; coleta de amostras de sedimentos em leito de rio; monitoramento de produção de sedimentos em parcelas de erosão; modelagem hidrossedimentológica. Estes procedimentos permitem a obtenção de resultados referentes à dinâmica e ao funcionamento do ciclo em uma determinada área, contribuindo para uma compreensão do desenvolvimento dos processos hidrossedimentológicos, principalmente em termos de erosão.

3.2 O fenômeno da erosão

A erosão é encarada como um dos principais problemas existentes tanto nas áreas rurais, dificultando a execução de atividades agrícolas, quanto em áreas urbanas, promovendo riscos à população quando da ocorrência de deslizamentos e escorregamentos de massa, promovendo impactos ambientais, sociais e econômicos.

Bertoni e Lombardi Neto (2010) conceituam o processo de erosão como sendo o “processo de desprendimento e arraste acelerado das partículas do solo causado pela água e pelo vento. A erosão do solo se constitui, sem dúvida, a principal causa do depauperamento acelerado das terras” (BERTONI e LOMBARDI NETO, 2010, p. 68). Os autores ainda chamam a atenção para a ação da água como principal agente causador de erosão em todo o mundo, seja em rios, lagos ou mares (ondas), e afirmam: “de fato, onde há água em

movimento, ela está erodindo os seus limites” (BERTONI e LOMBARDI NETO, 2010, p. 68).

O processo erosivo de fato é um fenômeno natural, o qual foi o responsável pelo modelamento do relevo da superfície terrestre ao longo do tempo. Porém, as atividades humanas contribuem consideravelmente para o aceleração deste processo no espaço, muitas vezes promovendo danos prejudiciais à própria sociedade. Nesse contexto, Silva et al. (2003) ressaltam a existência de dois tipos básicos de erosão: a) a erosão natural, que ocorre pela atuação dos fatores físicos e biológicos onde o ambiente se apresenta em condição natural, sem a presença de atividades humanas; e b) a erosão induzida ou acelerada, que ocorre quando o homem passa a modificar o espaço e assim promove uma aceleração no desenvolvimento dos processos erosivos no terreno, a exemplo de práticas de desmatamento de vegetação nativa.

Como comentado anteriormente, a água é o principal agente causador de erosão na superfície terrestre. Diversas são as formas de erosão hídrica que ocorrem no terreno, as quais variam de acordo com as características dos solos, do relevo, da chuva ou da geologia. Bertoni e Lombardi Neto (2010) e Silva et al. (2003) elencam algumas das formas de erosão mais recorrentes no meio rural e urbano, sendo elas:

- a) Erosão por impacto da gota de chuva: Considerada a primeira etapa do processo erosivo esta forma de erosão provoca a desagregação das partículas do solo por efeito dos impactos diretos das gotas de chuva no terreno. Os golpes sofridos pelo solo podem ocasionar tanto a compactação do terreno quanto a formação de pequenas crateras na sua superfície;
- b) Erosão laminar: Caracteriza-se por remover uma camada fina e consideravelmente uniforme da superfície do solo no terreno, sendo causa da ação da precipitação pluvial e do escoamento superficial. É a principal forma de erosão que afeta as atividades agrícolas, pondo em risco a fertilidade e a estrutura física do solo pela remoção do material pedogenético superficial.
- c) Erosão linear: Se dá pela acumulação de um fluxo de escoamento superficial de maneira linear, podendo ocorrer a formação de canais de dimensões variáveis no terreno de acordo com os aspectos da chuva, do relevo e do solo. Esta forma de erosão provoca verdadeiras incisões no solo, que se iniciam com pequenos sulcos (profundidade na escala de centímetros), evoluindo para ravinas, até chegar as proporções de uma voçoroca (em escala de alguns metros de profundidade).

- d) Erosão por deslizamento ou escorregamento: Ocorre quando há o movimento coletivo da massa de solo e/ou de corpos rochosos deslocados pela ação da gravidade somada à ocorrência de chuvas intensas continuadas, as quais saturam o solo (comprometendo a coesão de suas partículas) e o torna mais suscetível ao movimento. Podem apresentar maior grau de vulnerabilidade ao deslizamento quanto maior for o grau de declividade do terreno, a exemplo de relevos escarpados ou íngremes.
- e) Erosão em pedestal: É caracterizada pela formação de espécies de pedestais nos solos que apresentam suscetibilidade a erosão por efeito do salpicamento. Devido possuir algum objeto na sua parte superior (fragmento de rocha, raízes de árvore, ossos de animais, etc.) a porção do solo atacado por este tipo de erosão não apresenta nenhuma perda, enquanto que ao redor desta porção (onde o determinado objeto não é capaz de recobrir) o solo é carregado por não possuir nenhum tipo de proteção na sua parte superior. É possível deduzir, aproximadamente, a profundidade do solo que foi erodida a partir da observação da altura dos pedestais.
- f) Erosão em pináculo: Forma altos pináculos no fundo e nos lados das voçorocas devido às condições de suscetibilidade do solo, geralmente por efeito de uma camada de solo mais resistente ou pela existência de material rochoso na parte superior do solo. Assemelha-se à erosão em pedestal, no entanto as formas esculpidas por este tipo de erosão apresentam maiores dimensões, na maioria dos casos.
- g) Erosão em canais (ou erosão fluvial). Desenvolve-se de maneira contínua ao longo dos canais fluviais pela ação das correntes dos rios. Esse tipo de erosão é responsável pelo aprofundamento do talvegue dos canais e do alargamento dos leitos dos rios, onde o material pode ser depositado temporariamente ou permanentemente de acordo com as condições hidrológicas da área.

Os impactos negativos gerados por estas formas de erosão podem gerar problemas relacionados à diminuição da fertilidade do solo e à deterioração de sua estrutura física, por exemplo, pondo em risco não só a qualidade do solo, mas também a qualidade do ambiente. Então, como buscar maneiras de amenizar os efeitos danosos ocasionados pelos processos erosivos em uma área? A resposta para essa pergunta pode vir com as chamadas práticas conservacionistas.

3.3 Práticas conservacionistas

As práticas conservacionistas constituem-se como formas de utilização do terreno sem que exista a promoção de impactos que venham a por em risco a qualidade do solo, seja nas suas propriedades físicas, químicas ou biológicas. Estas práticas também “permitem controlar a erosão, ainda que não a anulem completamente, mas reduzem-na a proporções insignificantes” (LEPSCH, 2010, p. 197).

Podem ser aplicadas sem a necessidade de se investir um grande montante de capital para sua execução, sendo utilizadas através de técnicas que requerem o conhecimento do funcionamento dos processos erosivos e a sua relação com os elementos que compõem a paisagem.

Todavia, deve-se ter uma atenção especial no momento da aplicação destas técnicas na região onde se pretende utilizá-las. Muitas vezes determinada prática conservacionista não se adequa às condições ambientais da área em questão, podendo provocar no solo, ao invés de benefícios, impactos que danifiquem as suas propriedades (BERTONI e LOMBARDI NETO, 2010; LEPSCH, 2010).

De acordo com Lepsch (2010), estão divididas em três grupos principais as práticas de conservação do solo, sendo elas: a) práticas de caráter edáfico; b) práticas de caráter mecânico; e c) práticas de caráter vegetativo. Devido à considerável quantidade de práticas conservacionistas serão apresentadas aquelas que mais se adequam à bacia do Rio Taperoá, isto é, a uma área de clima semiárido.

3.3.1 Práticas de caráter edáfico

As práticas de caráter edáfico estão ligadas às características intrínsecas do solo, com o objetivo de melhorar sua fertilidade e disponibilizar nutrientes para o crescimento das plantas.

A adubação com matéria orgânica é uma prática que visa fornecer elementos nutritivos pouco presentes no solo e que ajudam ao crescimento de determinadas culturas, sendo os principais o nitrogênio, o fósforo, o potássio e o enxofre. A utilização de corretivos naturais, como o calcário moído, também auxiliam na correção das deficiências naturais do solo (nutrientes), além de diminuir a acidez deste com a elevação dos valores de seu pH, contribuindo para a eliminação de elementos tóxicos, como o alumínio.

3.3.2 Práticas de caráter mecânico

Já as práticas de caráter mecânico “são aquelas em que se recorre a estruturas artificiais mediante a disposição adequada de porções de terra, com a finalidade de quebrar a velocidade de escoamento da enxurrada e facilitar-lhe a infiltração no solo” (BERTONI e LOMBARDI NETO, 2010, p. 114).

O terraceamento é um bom exemplo de como amenizar os efeitos negativos causados pela erosão no terreno. Este método consiste na construção de terraços formados por canais e camalhões (diques de terra) ao longo do terreno no sentido transversal de sua inclinação com o objetivo de diminuir a velocidade do escoamento e, conseqüentemente, promover a infiltração da água no solo.

Outra prática de caráter mecânico que pode ser utilizada em uma área de clima semiárido é o plantio em curvas de nível, o qual consiste em promover o plantio e o cultivo no sentido perpendicular a inclinação do terreno, semelhante ao terraceamento. Nessa prática, cada fileira atua como pequenos sulcos e montículos de terra, deixados pelas máquinas utilizadas no preparo do solo (arado ou trator, por exemplo), que servem de obstáculo para a enxurrada. O plantio em curvas de nível “é uma prática que, além de ser de simples controle da erosão, facilita a adoção de outras práticas complementares de caráter vegetativo” (Lepsch, 2010, p. 200).

3.3.3 Práticas de caráter vegetativo

Por fim, as práticas de caráter vegetativo estão relacionadas ao aumento da área de cobertura superficial pela vegetação no solo, proporcionando um cultivo que ameniza os danos causados pela erosão. Esta prática consiste em recobrir o solo com plantas, folhagens ou resíduos vegetais, que ao passo em que protegem o terreno do impacto direto das gotas de chuva também fornecem matéria orgânica e sombra ao solo.

Recobrir o solo com algum tipo de matéria vegetal ou plantar árvores que promovam maior cobertura superficial ao solo pode ser uma técnica bastante rentável do ponto de visto do custo-benefício, pois está se amenizando os impactos ocasionados pelos processos erosivos sem a necessidade de grande investimento financeiro.

Com isso, vê-se que é possível amenizar os efeitos nocivos causados pela ação da erosão no solo a um baixo custo que permita ao agricultor a aplicação de técnicas promissoras de manejo do solo, sobretudo àquelas famílias que dependem essencialmente da produção agrícola para garantir a sua renda.

Portanto, os danos promovidos pela erosão podem ser quantificados de acordo com as metodologias existentes para o estudo dos processos erosivos, que vão desde técnicas de monitoramento do processo até as técnicas mais complexas para avaliação dos efeitos da erosão, como a simulação e geração de cenários de uma determinada área em que a erosão ocorra, por exemplo. A seguir será apresentada uma das técnicas bastante utilizadas atualmente para estudar a dinâmica tanto dos processos erosivos quanto a dos processos relacionados à erosão: a modelagem.

3.4 Modelagem hidrossedimentológica

A partir da utilização de um modelo é possível compreender com maior clareza os processos e fenômenos físicos existentes em uma dada área, sendo possível sistematizar as suas dinâmicas e determinar os fatores (naturais ou antrópicos) responsáveis pela ocorrência destes no espaço. Mas o que se entende por modelo? Qual o objetivo de sua utilização?

Diversas são as definições encontradas na literatura que buscam dar resposta a estas perguntas. No entanto, a conceituação proposta por Tucci (2005) apresenta grande relevância para o entendimento do que vem a ser um modelo, tanto por expor clareza quanto por ser referenciada por diversos trabalhos que tratam de temáticas relacionadas à Hidrologia e a Hidrossedimentologia. Desse modo, um modelo pode ser entendido como “a representação de algum objeto ou sistema¹, numa linguagem ou forma de fácil acesso e uso, com o objetivo de entendê-lo e buscar respostas para diferentes entradas” (Tucci, 2005, p. 17). Em outras palavras: um modelo é a abstração/simplificação da realidade.

Christofolletti (1999) abrange ainda mais o conceito de modelo e o define como sendo “qualquer representação simplificada da realidade ou de um aspecto do mundo real que surja como interesse ao pesquisador, que possibilite reconstruir a realidade, prever um comportamento, uma transformação ou uma evolução” (CHRISTOFOLETTI, 1999, p. 8).

Desse modo, os modelos podem ser classificados em três classes, de acordo com Tucci (2005): físicos, analógicos e matemáticos. Os modelos físicos representam a realidade através de um protótipo semelhante ao sistema que se deseja estudar: uma bacia hidrográfica com área de milhares de quilômetros quadrados pode ser representada por um protótipo (modelo) em uma sala com alguns metros quadrados de área. Já os modelos analógicos utilizam equações de um sistema para modelar os processos existentes em um sistema diferente, sendo

¹ Neste caso, entende-se sistema como sendo uma porção da superfície terrestre onde ocorrem processos físicos, químicos, biológicos, sociais, econômicos, entre outros.

essas equações utilizadas por analogia. E finalmente os modelos matemáticos simulam a realidade a partir de equações matemáticas, que exprimem a natureza e o funcionamento dos processos no sistema.

Nos estudos relacionados às temáticas da Hidrologia e da Hidrossedimentologia normalmente são utilizados os modelos matemáticos para representar a dinâmica dos processos existentes em uma determinada área. Estes modelos possuem características próprias que os diferenciam uns dos outros de acordo com o método de análise dos processos. Assim, Tucci (2005) oferece uma classificação dos tipos de modelos que podem ser utilizados para o desenvolvimento de uma pesquisa, sendo:

- a) Conceitual. Diz-se do tipo de modelo capaz de simular fenômenos em uma área levando em consideração os processos físicos que ocorrem neste ambiente. Também são chamados de modelos de base física.
- b) Empírico. Objetivam ajustar os valores calculados aos dados observados através de funções estatísticas que não têm relação com os processos físicos envolvidos.
- c) Distribuído. Quando as variáveis e parâmetros que constituem o modelo apresentam alguma variabilidade espacial.
- d) Concentrado. Ao contrário do modelo distribuído, o modelo concentrado não possui uma variabilidade espacial e se baseia em valores médios da área para realizar as simulações.
- e) Contínuo. Capaz de modelar os fenômenos e processos existentes na superfície terrestre ao longo de um determinado período de tempo.
- f) Discreto. Quando as modificações que ocorrem em determinada área se dão em intervalos discretos.

É importante ressaltar que um único modelo pode apresentar mais de uma das características citadas acima, como bem aponta (GELER ROFFE, 2012), de acordo com as funções matemáticas e com o objetivo a que se propõe ser utilizado.

Atualmente os modelos hidrológicos e hidrossedimentológicos estão sendo cada vez mais utilizados em associação aos SIG, exatamente por estes últimos possibilitarem o desenvolvimento de pesquisas voltadas à análise espacial dos processos físicos existentes em bacias hidrográficas. Os SIG se constituem como ferramentas fundamentais para a análise espaço-temporal dos fenômenos existentes na superfície terrestre, realizando processamentos que vão desde o tratamento de imagens de satélite provenientes do sensoriamento remoto até a utilização de mapas temáticos, facilitando a execução de pesquisas que se destinam a avaliar

as modificações promovidas pelas atividades humanas no espaço (SILVA et al., 2003), a exemplo de estudos que relacionem o comportamento da erosão com as mudanças no uso do solo de uma bacia hidrográfica ao longo do tempo.

Com o uso dos SIG é possível identificar as áreas que estão apresentando maiores taxas de produção de sedimento ao longo da bacia hidrográfica e a partir de então relacionar com os fatores responsáveis pela ocorrência desse processo, como tipos de solos, declividade, uso do solo, geologia, entre outros. Com isso, as medidas de planejamento ambiental podem ser pensadas com maior grau de confiabilidade, uma vez que se tem um panorama geral de onde e como está ocorrendo o fenômeno analisado.

Mendes e Cirilo (2013) ressaltam que a aplicação conjunta das técnicas de geoprocessamento, sobretudo de SIG, e de modelagem matemática se tornam poderosas ferramentas para a realização de análises muitas vezes consideradas complexas, dadas as interações dos diversos processos e suas dinâmicas no âmbito de uma bacia hidrográfica. A realização de uma análise articulada dos elementos e fenômenos que existem em uma bacia hidrográfica levando em consideração a variabilidade espacial e temporal, como a influência da vegetação, tipos de solos, uso do solo, declividade e precipitação, para a ocorrência do escoamento superficial, por exemplo, pode gerar resultados mais satisfatórios do que a aplicação destas técnicas de maneira separada.

Vários modelos hidrossedimentológicos possuem integração com os SIG. Dentre de vários existentes, podem ser destacados: MUSLE (WILLIAMS, 1975), WEPP (LANE et al., 1992), Kinos2 (WOOLHISER et. al., 1990) e SWAT (ARNOLD et al., 1998). A partir da utilização destes modelos inúmeros estudos vêm sendo desenvolvidos ao longo do tempo em busca de responder às questões relacionadas à dinâmica hidrossedimentológica em bacia hidrográficas, abrangendo diversas áreas do conhecimento e numerosos pesquisadores em todo o mundo.

3.4.1 Breves comentários sobre a evolução da modelagem hidrossedimentológica

A busca pela compreensão da dinâmica hidrossedimentológica é uma das principais demandas experimentadas pelas ciências que se destinam a estudar o comportamento dos processos hidrossedimentológicos no espaço, a exemplo da Hidrologia, Agronomia, Geografia, Geomorfologia e as Engenharias Civil, Agrícola e Ambiental, principalmente através de uma perspectiva de planejamento e gestão ambiental, como práticas de conservação do solo e da qualidade da água e controle de movimentos de massa em encostas.

Na segunda metade do século XX surgiram diversos modelos que objetivam estudar os processos hidrossedimentológicos em diferentes escalas espaciais, seja em encostas, parcelas ou bacias hidrográficas. A *Universal Soil Loss Equation* – USLE (WISCHMEIER e SMITH, 1965), por exemplo, foi um modelo desenvolvido para quantificar perdas de solo que apresentou grande relevância para as pesquisas relacionadas ao estudo da erosão por permitir estimar com maior precisão o processo erosivo em uma dada área. Este modelo foi amplamente utilizado por pesquisadores de todo o mundo, possibilitando a elaboração de novas perspectivas de investigação e influenciando a construção de novos modelos destinados à análise da erosão.

Após o surgimento da USLE diversos modelos capazes de simular a dinâmica hidrossedimentológica passaram a serem elaborados em diversos países, principalmente nos Estados Unidos com o *Agricultural Research Service* – ARS (GASSMAN et al., 2007). O ARS foi responsável pelo desenvolvimento de alguns modelos que buscavam simular processos físicos que influenciam a execução de atividades agrícolas em áreas rurais, envolvendo erosão, escoamento superficial, compostos químicos no solo, evapotranspiração, qualidade da água, entre outros.

Destacam-se entre os modelos desenvolvidos pelo ARS o *Chemicals, Runoff and Erosion for Agricultural Management Systems* – CREAMS (KNISEL, 1980), capaz de calcular produção de sedimentos, qualidade da água e escoamento superficial em parcelas; o *Groundwater Loading Effects on Agricultural Management Systems* – GLEAMS (LEONARD et al., 1987), que estima escoamento superficial, compostos químicos e nutrientes no solo e produção de sedimentos também em parcelas; o *Erosion Productivity Impact Calculator* – EPIC (WILLIAMS et al., 1984), voltado para a estimativa da produção de sedimentos; o *Simulator for Water Resources in Rural Basins* – SWRRB (WILLIAMS et al., 1985), o qual permite a estimativa da produção de sedimentos, transporte de compostos químicos e de nutrientes e escoamento superficial em pequenas bacias hidrográficas; e o

SWAT (ARNOLD et al., 1998), que simula o escoamento superficial, a produção de sedimentos, compostos químicos no solo, transporte de sedimentos, entre outros processos, para bacias hidrográficas de pequena, média e grande dimensão. Salienta-se que existem características comuns a todos os modelos citados acima, como a capacidade de simular os processos em um período de tempo contínuo e a natureza destes, sendo todos modelos de base física (conceituais).

Portanto, diversas pesquisas que utilizam a modelagem hidrossedimentológica como metodologia vêm sendo realizadas em diversas áreas do conhecimento ao longo dos anos em diversas partes do mundo. Devido à enorme quantidade de trabalhos existentes em todo o mundo sobre esse tema serão apresentados, a seguir, alguns estudos que usam a modelagem hidrossedimentológica no Brasil.

3.4.2 Aplicações de modelagem hidrossedimentológica no Brasil

Aplicando o modelo SWAT para a bacia experimental de São João do Cariri, localizada no estado da Paraíba, Carvalho Neto (2011) objetivou analisar a influência das mudanças no uso do solo (através da criação de cenários) e a interferência de açudes no comportamento da produção de sedimentos e do escoamento superficial. O autor verificou que os açudes foram responsáveis pela diminuição das taxas de vazão e da carga de sedimentos na bacia. Concluiu também que o cenário caracterizado por reflorestamento com a cultura de algaroba apresentou maior grau de proteção ao solo do que o cenário em que o reflorestamento se daria pela vegetação de Caatinga.

Avaliando o desempenho dos modelos USLE, RUSLE e WEPP para a predição de erosão sob diferentes condições edafoclimáticas no território brasileiro, Amorim et al. (2010) identificou que o modelo WEPP apresentou um melhor desempenho na estimativa de erosão em parcelas em relação aos demais modelos. Contudo, de maneira geral, os modelos não apresentaram bom ajuste quando comparados com os dados observados para as características de manejo de solo utilizado nas localidades examinadas.

Tesch (2014) estudou o comportamento da produção de sedimentos e da vazão em estradas não pavimentadas na sub-bacia do Rio Perdido, estado do Espírito Santo, através da utilização do modelo SWAT. O autor analisou estes processos a partir do estabelecimento de dois cenários: 1) inexistência de estradas não pavimentadas na sub-bacia; e 2) existência de estradas pavimentadas como parte do uso do solo da sub-bacia. Os resultados obtidos demonstram um desempenho ruim para a simulação das vazões de pequena magnitude em

ambos os cenários. Todavia, do ponto de vista da produção de sedimentos, o cenário 1 apresentou um melhor desempenho do modelo do que o cenário 2.

Moro (2005) analisou a produção de sedimentos e o escoamento superficial na Microbacia Hidrográfica do Ribeirão dos Marins, estado de São Paulo, com base na aplicação do modelo SWAT levando em consideração as características do uso do solo na área. Os resultados encontrados na pesquisa apontam para um aumento considerável nas taxas de produção de sedimentos e de escoamento superficial nas áreas onde predominam o cultivo da cana-de-açúcar, e, em contrapartida, verificou um decréscimo na intensidade desses processos nas áreas onde predominava a vegetação nativa. A autora concluiu que o modelo apresentou um bom ajuste nas simulações quando comparadas com os dados hidrossedimentológicos coletados no posto de observação localizado na microbacia.

É de se ressaltar a grande quantidade de pesquisas que utilizam o modelo SWAT como metodologia de análise dos processos hidrossedimentológicos no Brasil em relação aos demais modelos, como o WEPP, EPIC e GLEAMS, por exemplo. Também se verifica a predominância dos trabalhos desenvolvidos por pesquisadores das áreas das Engenharias Civil, Ambiental e Agrícola, bem como de pesquisadores da Agronomia. Contudo, a seguir serão apresentados alguns trabalhos realizados na área de Geografia no Brasil.

3.4.3 Aplicações de modelagem hidrossedimentológica na Geografia brasileira

Utilizando o modelo SWAT para verificar o comportamento da vazão e da produção de sedimentos na bacia do córrego Santa Maria, estado do Rio de Janeiro, Marchioro (2008) avaliou a influência das modificações do uso do solo para a dinâmica destes processos através da geração de dois cenários de uso do solo: 1) uso do solo atual da bacia; e 2) uso do solo levando em consideração a legislação do Código Florestal brasileiro. A partir dos resultados obtidos, o autor constatou que a utilização do cenário 2 promoveu a diminuição das taxas de produção de sedimentos em relação ao cenário 1, tornando possível a aplicação do Código Florestal na bacia. Ainda concluiu que o modelo apresentou resultados satisfatórios para a simulação da vazão com base no coeficiente de desempenho do modelo, porém os resultados referentes à produção de sedimentos indicam um ajuste ruim do modelo em relação a este processo.

Schultz et al. (2010) também aplicaram o modelo SWAT para medir a produção de sedimentos na bacia do Altíssimo Rio Negro, na divisa entre os estados do Paraná e Santa Catarina, em escalas diária e mensal. Os autores demonstraram que o modelo apresentou um

bom ajuste para a produção de sedimentos em escala mensal, mas com ajuste ruim em escala diária. Todavia, o modelo conseguiu se aproximar da produção de sedimentos média para a série de dados utilizados, estimando 231 t/dia em comparação com as 236 t/dia observadas.

Domingos (2006) estudou as perdas de solo por erosão na bacia que compreende os córregos Rangel, Penha e Santo Antônio, localizados no município de Bananal – ES, através da aplicação da USLE. Foi estimada uma perda de solo para a bacia equivalente a 2.661 t/ha/ano com base no uso do solo atual. Contudo, o autor gerou um cenário alternativo para o uso do solo na bacia considerando o estabelecimento das áreas de APP - Área de Preservação Permanente, o que correspondeu à diminuição nas perdas de solo de 253 t/ha/ano, 9,5% a menos do total.

Geler Roffe (2012) também aplicou o modelo SWAT para simular a produção de sedimentos e o escoamento superficial na bacia do Rio Chambas, em Cuba, com base na geração de diferentes cenários de uso do solo em dois momentos: 1) reordenamento e intensificação da produção de cana-de-açúcar na região; e 2) arrefecimento da atividade canavieira na região. Os resultados mostram um aumento progressivo da produção de sedimentos na bacia no período entre 2000 e 2020 de acordo com os cenários utilizados. A autora recomenda a implementação de reflorestamento com vegetação nativa, mata ciliar e vegetação arbustiva para buscar a diminuição da produção de sedimentos na bacia através da mudança na sua cobertura superficial. Ressalta-se que mesmo o trabalho sendo aplicado para uma bacia hidrográfica que não pertence ao território brasileiro ele foi desenvolvido na Universidade Estadual de Campinas – UNICAMP, portanto, considera-se um trabalho desenvolvido no âmbito da Geografia brasileira.

Novamente, é de se ressaltar a predominância dos estudos que utilizam o modelo SWAT como ferramenta de análise dos processos hidrossedimentológicos em diferentes regiões do Brasil. Destaca-se, contudo, a utilização dos SIG em associação aos modelos hidrossedimentológicos nas pesquisas voltadas ao estudo da erosão e do escoamento superficial em bacias hidrográficas, permitindo uma investigação espaço-temporal do comportamento destes processos.

4 PROCEDIMENTOS METODOLÓGICOS

A metodologia aplicada para o desenvolvimento do presente estudo pautou-se na utilização do modelo SWAT para a obtenção dos resultados propostos com os objetivos. Contudo, para a aplicação do SWAT, é necessária a aquisição de diversos dados referentes à área que se está investigando, a exemplo de dados de precipitação, tipos de solo, declividade, uso do solo, entre outros. Os dados são fornecidos ao modelo através de um SIG. Desse modo, este tópico irá apresentar as características do modelo SWAT, bem como os dados utilizados para a modelagem e como estes dados foram organizados para serem fornecidos ao modelo.

4.1 Breve descrição do modelo SWAT

O SWAT (ARNOLD et al., 1998) se constitui como um modelo hidrossedimentológico de base física capaz de simular processos de escoamento superficial, produção de sedimentos, transporte de nutrientes e compostos químicos no solo, por exemplo, em escala de bacia hidrográfica para longas séries temporais, operando em um intervalo de tempo diário. Esta ferramenta está sendo cada vez mais utilizada em nível mundial para as mais diversas linhas de pesquisas por se tratar de um modelo distribuído, capaz de espacializar os processos físicos em escala de bacia hidrográfica, e por levar em consideração informações sobre clima, hidrologia, propriedades do solo, uso e ocupação do solo, topografia, entre outros parâmetros que possibilitam a obtenção de resultados mais robustos sobre processos físicos muitas vezes complexos (GASSMAN et al., 2007).

De acordo com Gassman et al. (2007), o SWAT é resultado do aprimoramento de outros modelos desenvolvidos pelo ARS, órgão vinculado ao USDA – *United States Department of Agricultural* nos Estados Unidos, para possibilitar uma melhor gestão das atividades agrícolas no país. Entre os modelos desenvolvidos pelo ARS que contribuíram para a construção do SWAT estão o CREAMS, o GLEAMS, o EPIC e o SWRRB, todos modelos de base física que operam em escala de tempo contínua, como já citado anteriormente.

O SWAT é composto por diversas equações que simulam processos físicos existentes na superfície terrestre, podendo ser dividido em oito categorias (ARNOLD et al., 1998), que são: hidrologia, sedimentologia, temperatura do solo, crescimento de culturas agrícolas, nutrientes, pesticidas e manejo agrícola. Devido à grande quantidade de equações presentes no modelo serão apresentadas a seguir apenas aquelas relacionadas ao escoamento superficial e à produção de sedimentos, os quais são o foco deste trabalho.

A hidrologia do modelo, de acordo com Neitsch et al. (2011), está baseada na equação de balanço hídrico, a qual compreende os principais componentes do ciclo hidrológico e é dada pela Eq. 1:

$$SW_t = SW_0 + \sum_{i=1}^t (R_{day} - Q_{surf} - E_a - W_{seep} - Q_{gw}) \quad (1)$$

em que SW_t é a quantidade de água no solo no fim do dia i (mm); SW_0 a quantidade de água no solo no início do dia i (mm); t o intervalo de tempo (dias); R_{day} a precipitação no dia i (mm); Q_{surf} o escoamento superficial no dia i (mm); E_a a quantidade de evapotranspiração no dia i (mm); W_{seep} a quantidade de água presente na zona vadosa do solo no dia i (mm); e Q_{gw} quantidade de água em fluxo de retorno no dia i (mm).

O escoamento superficial é calculado com base nos valores de precipitação diária e no método de curva número (CN) desenvolvido pelo SCS – *Soil Conservation Service*. O escoamento superficial é obtido através da Eq. 2:

$$Q_{surf} = \frac{(R - 0,2S)^2}{R + 0,8S} \quad (2)$$

em que Q_{surf} é o escoamento superficial (mm); R é a precipitação do dia (mm); e S é o parâmetro de retenção de água no solo. Este parâmetro varia de acordo com as características do tipo de solo, declividade e uso do solo e com o tempo em que a água permanece no solo. Os valores de s variam de 1, quando o solo está totalmente seco, a 100, quando o solo está totalmente saturado, e é dado pela Eq. 3:

$$S = 25,4 \left(\frac{1000}{CN} - 10 \right) \quad (3)$$

em que CN indica o grau de permeabilidade do solo, variando de 1 (solo totalmente permeável) a 100 (solo impermeável).

No caso da estimativa da produção de sedimentos o modelo usa a MUSLE (WILLIAMS, 1975), no calculo deste processo, sendo obtida pela Eq. 4:

$$sed = 11,8 \cdot (Q_{surf} \cdot q_{peak} \cdot area_{hru})^{0,56} \cdot K_{USLE} \cdot C_{USLE} \cdot P_{USLE} \cdot LS_{USLE} \cdot CFRG \quad (4)$$

em que sed é a produção de sedimentos (t); Q_{surf} o volume de escoamento superficial (mm/ha); q_{peak} o pico de escoamento superficial (m³/s); $area_{hru}$ a área da unidade de resposta

hidrológica (ha); K_{USLE} o fator de erodibilidade do solo; C_{USLE} o fator de uso e manejo do solo; P_{USLE} o fator de práticas conservacionistas; LS_{USLE} o fator de topografia do terreno; e $CFRG$ o fator de fragmento grosseiro, que considera o afloramento de rocha na área.

Além destas equações, existem várias outras relacionadas ao transporte de sedimentos nos canais, fluxos de água subsuperficial e subterrâneo, transporte de nutrientes, quantidade de compostos químicos no solo, evapotranspiração, percolação da água no solo, deposição de sedimentos em reservatórios, entre várias outras. Para verificar todas as equações que compõem o SWAT consulte Arnold et al. (1998) e Neitsch et al. (2011).

4.2 Construção do banco de dados do modelo e dados utilizados na modelagem

Para o desenvolvimento da pesquisa foram utilizados diversos dados e informações que permitiram a obtenção dos resultados propostos. Estes dados correspondem a dados tabulares e de base cartográfica, sendo os primeiros representados por dados climáticos e hidrológicos e os últimos por mapas de uso do solo, tipos de solo e Modelo Digital de Elevação – MDE. Também foram adquiridas informações na literatura que serviram de base para a pesquisa, como parâmetros de solo, características do uso do solo, índices de desempenho do modelo, parâmetros de avaliação dos resultados encontrados, entre outros.

Os dados exigidos pelo SWAT para a realização das simulações foram fornecidos ao modelo por meio do *software* ArcSWAT, que foi desenvolvido para ser integrado ao SIG ArcGIS, pertencente ao *Environmental Systems Research Institute* – ESRI. A interface do ArcSWAT tem o intuito de facilitar a organização dos dados que serão utilizados na aplicação do SWAT, pois sem o auxílio de um *software* com interface gráfica acoplada a um SIG se torna bastante complexa a organização destes dados para serem fornecidos ao modelo.

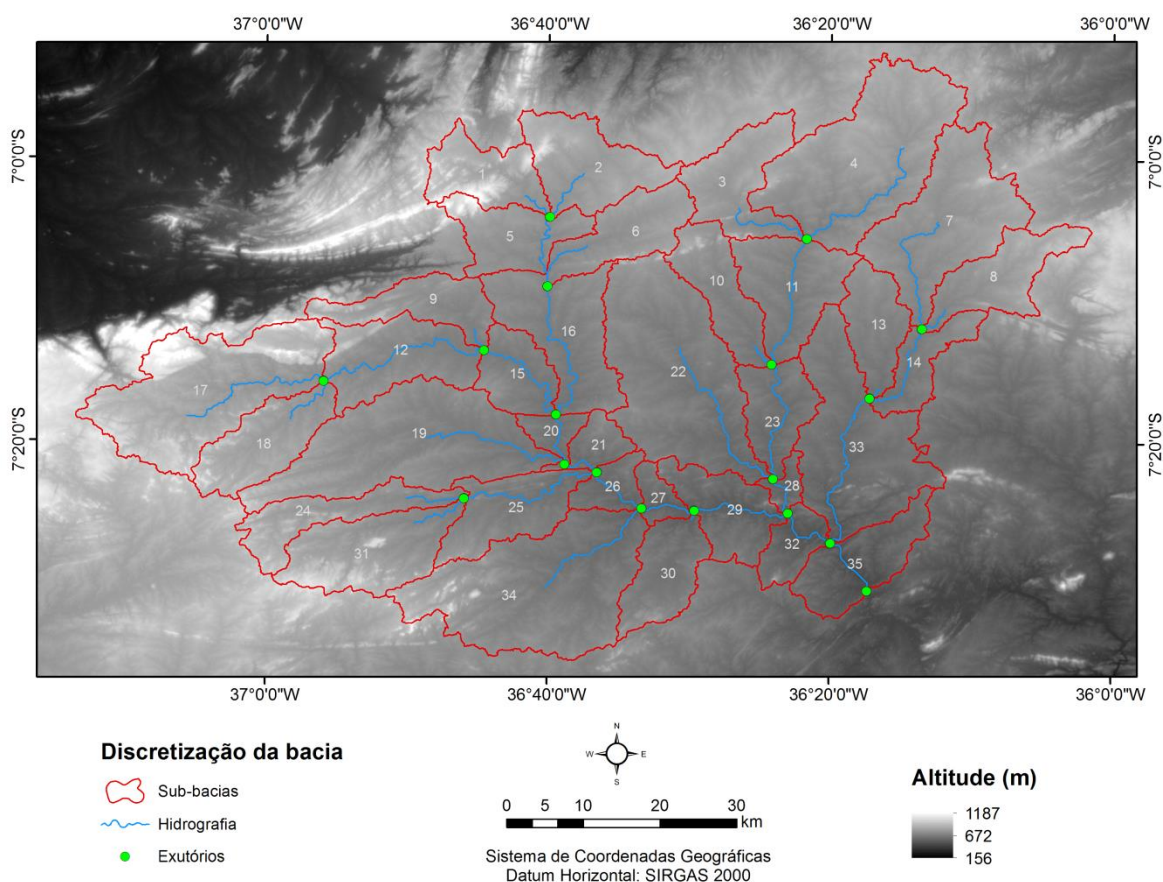
O SWAT necessita da construção de um banco de dados de entrada para simular os processos físicos existentes na bacia hidrográfica. O modelo segue algumas etapas na construção do banco de dados de entrada para gerar os resultados, sendo elas: a) inserção do MDE e discretização da bacia hidrográfica; b) inserção dos mapas de uso do solo, tipos de solo e declividade para a criação das unidades de resposta hidrológica; e c) fornecimento dos dados climáticos para o início da modelagem.

O período estudado foi de 1970 a 1990. Dessa maneira, os dados climáticos e hidrológicos, de uso do solo e dos tipos de solo foram obtidos com base nessa série temporal. A seguir serão apresentados a forma de construção do banco de dados do SWAT e os dados utilizados na modelagem.

4.2.1 Discretização da bacia hidrográfica

Como primeira etapa da construção do banco de dados de entrada o modelo necessita que se insira o MDE para a discretização da bacia hidrográfica (Figura 4). Nessa primeira parte o modelo irá, nessa ordem: identificar o direcionamento e acumulação do fluxo de escoamento superficial no terreno; gerar a rede hidrográfica do MDE (a área mínima de acumulação de fluxo pelos canais é de 10000 ha); gerar as sub-bacias e os exutórios de cada uma delas; delimitar a bacia hidrográfica com base na definição de seu exutório; e calcular os parâmetros relacionados à topografia em cada sub-bacia. No final desta etapa ainda é possível inserir informações sobre reservatórios que existam ao longo da bacia hidrográfica. Como não foram coletados dados relacionados aos reservatórios existentes na bacia do Rio Taperoá a modelagem se fez com base na dinâmica natural dos canais de drenagem, ou seja, sem nenhuma interceptação do fluxo da água ao longo da hidrografia.

Figura 4 – Discretização da bacia do Rio Taperoá em sub-bacias e geração da rede hidrográfica



Fonte: Autor (2016).

O Modelo Digital de Elevação foi obtido através de INPE (2015a). Estes dados correspondem à missão *Shuttle Radar Topography Mission* – SRTM que teve o objetivo de realizar um levantamento altimétrico da superfície terrestre, proporcionando o desenvolvimento de estudos cada vez mais robustos em relação às questões espaciais (VITAL et al., 2010).

O MDE permite que se realizem diversas operações espaciais da área que se deseja estudar. Estas operações variam desde a discretização de uma bacia hidrográfica, geração de curvas de nível, até a identificação da declividade da área em questão.

4.2.2 Geração das unidades de resposta hidrológica

Após a discretização da bacia parte-se para a criação das unidades de resposta hidrológica, do inglês *Hidrologic Response Units* – HRU. As HRU são áreas com características homogêneas de uso do solo, tipos de solo e declividade. Por exemplo, as áreas que possuem o uso do solo do tipo Vegetação Herbácea, o solo do tipo Luvisolo e a declividade no intervalo entre 8% e 20% irão pertencer a uma determinada HRU. Se outra área possuir o mesmo uso do solo e o mesmo tipo de solo, porém a classe de declividade passou a estar entre 3% e 8% ela será identificada como outra HRU. Cada combinação diferente entre uso do solo, tipo de solo e declividade irá gerar uma HRU diferente. Os dados de uso do solo, tipos de solo e declividade serão apresentados a seguir.

4.2.2.1 Uso do solo

O uso do solo é um importante parâmetro para o estudo dos processos hidrossedimentológicos de uma área, visto que demonstra a situação da cobertura superficial a qual o terreno está submetido, influenciando diretamente na dinâmica do escoamento superficial e da erosão.

Para este estudo, o uso do solo foi estabelecido para a bacia do Rio Taperoá a partir de imagens de satélite que permitiram realizar o mapeamento das classes de uso do solo identificadas na bacia. Assim, o uso do solo foi dividido em dois momentos: o primeiro com a classificação do uso do solo para o período de 1970 a 1980; e o segundo com a classificação para o período de 1981 a 1990. Por questões metodológicas, o período de 1970 a 1980 será denominado de 1º período e o período de 1981 a 1990 de 2º período.

A classificação do uso do solo para o 1º período foi realizada através da utilização de um mosaico de duas imagens de satélite que compreendem a área da bacia, sendo estas adquiridas junto ao Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais – INPE. Para a classificação do uso do solo no 2º período fez-se uso de uma imagem de satélite também obtida no INPE. Algumas características das imagens podem ser vistas na Tabela 1.

Tabela 1 – Informações sobre as imagens utilizadas na classificação do uso do solo na bacia

| Data da Imagem | Satélite | Sensor | Órbita | Ponto | Bandas | Resolução Espacial |
|----------------|-----------|--------|--------|-------|-------------|--------------------|
| 02/08/1980 | LANDSAT 2 | MSS | 230 | 65 | 4-6-5 (RGB) | 80 m |
| 09/10/1981 | LANDSAT 2 | MSS | 231 | 65 | 4-6-5 (RGB) | 80 m |
| 18/06/1990 | LANDSAT 5 | TM | 215 | 65 | 3-4-2 (RGB) | 30 m |

Fonte: INPE (2015b).

Para as classificações do uso do solo foi utilizado o método não supervisionado *Maximum Likelihood Classification* pelo fato de se tratar de uma área de grande extensão territorial, pela dificuldade na interpretação da vegetação do tipo de caatinga, e pelas resoluções espaciais das imagens não permitirem uma visualização mais acurada do terreno. Esse método de classificação identifica as classes existentes na imagem automaticamente, sem a necessidade do usuário indicar as classes que se deseja identificar.

O *software* utilizado na classificação do uso do solo da bacia (ArcGIS 10.1) inicialmente encontrou sete classes para ambas as classificações. No entanto, para melhor sistematizar as informações, fez-se a aglutinação entre classes até que se chegassem ao total de cinco classes para as duas classificações. Essa aglutinação foi feita unindo as classes semelhantes geradas pelo *software*.

Desse modo, as classes que compõem a bacia do Rio Taperoá são: Corpo Hídrico, Vegetação Arbórea/Arbustiva (aglutinada), Vegetação Arbustiva, Vegetação Arbustiva/Herbácea (aglutinada) e Vegetação Herbácea (Tabela 2). Salienta-se que por efeito da resolução espacial das imagens a classe Vegetação Herbácea aglutina as áreas de vegetação herbácea, solo exposto, agricultura e pecuária. Ressalta-se, ainda, que foram estabelecidas as mesmas classes de uso do solo para os dois períodos devido à análise que será feita sobre as mudanças no uso do solo na bacia ao longo dos anos.

Tabela 2 – Classes de uso do solo identificadas na bacia e a associação com as classes de uso do solo do banco de dados do SWAT

| Classe de uso do solo na bacia | Classe de uso do solo no SWAT |
|---------------------------------------|--------------------------------------|
| Corpo Hídrico | <i>Water – WATR</i> |
| Vegetação Arbórea/Arbustiva | <i>Forested Mixed - FRST</i> |
| Vegetação Arbustiva | <i>Range-Brush – RNGB</i> |
| Vegetação Arbustiva/Herbácea | <i>Range-Grass – RNGE</i> |
| Vegetação Herbácea | <i>Barren - BARR</i> |

Fonte: Autor (2016).

O SWAT possui um banco de dados próprio com diversos parâmetros que influenciam nos processos de escoamento superficial e na produção de sedimentos para cada classe de uso do solo. A exemplo da vegetação, Carvalho Neto (2011) afirma que os parâmetros de índice de área foliar (BLAI), altura da copa (CHTMX) e profundidade da raiz (SOL_ZMX) são bastante influentes para o comportamento destes processos.

Diante disso, foi feita uma associação das classes de uso do solo identificadas na bacia do Rio Taperoá com as classes existentes no banco de dados do modelo, resultando em uma reclassificação do uso do solo na bacia com base nos parâmetros do SWAT. A associação entre as classes de uso do solo da bacia e as classes existentes no banco de dados do SWAT levou em consideração, principalmente, as características de porte da vegetação (com exceção da classe de Corpo Hídrico). A Tabela 2 também mostra a associação das classes de uso do solo da bacia com as classes do banco de dados do SWAT.

4.2.2.2 Tipos de solo

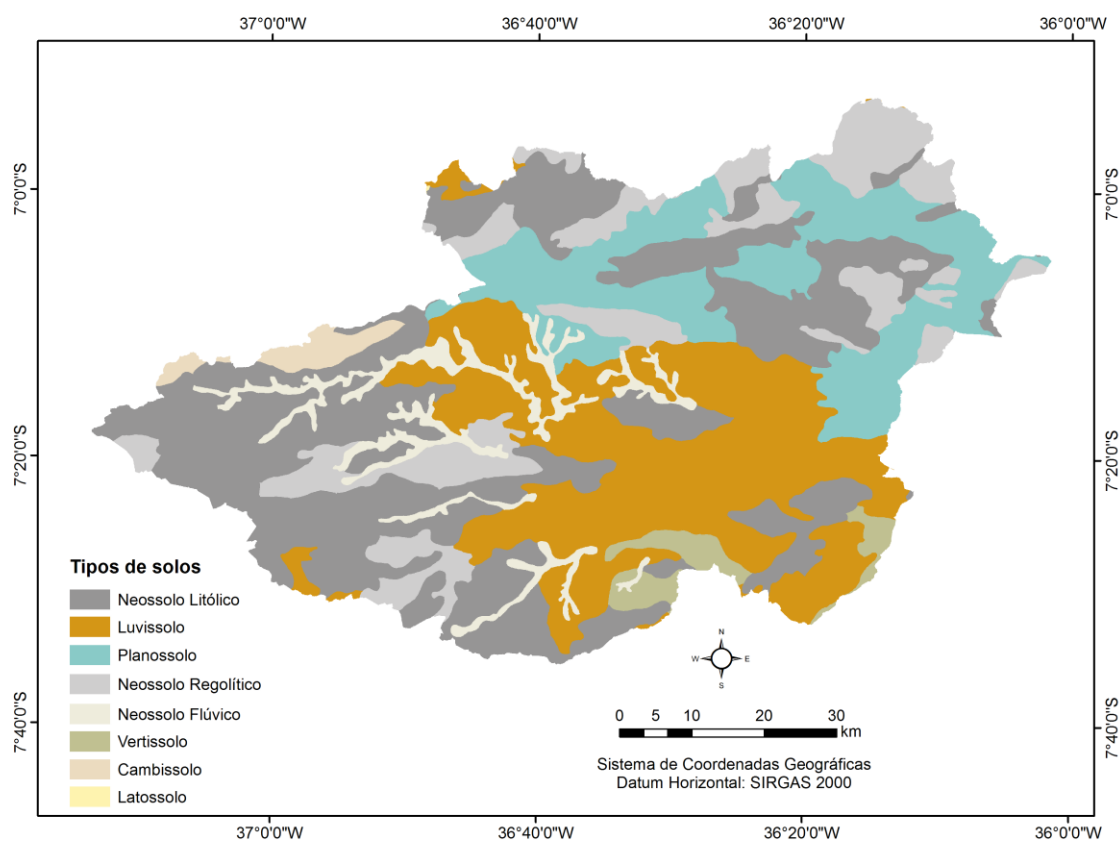
De acordo com AESA (2015), a bacia do Rio Taperoá possui oito tipos de solos (lê-se unidades de solos) em toda a sua área (Tabela 3). A Figura 5 expõe a distribuição espacial dos tipos de solos ao longo da bacia.

Os parâmetros para os tipos de solos existentes na bacia foram obtidos através do Sistema de Informação de Solos Brasileiros (EMBRAPA, 2015). Este banco de dados contém diversas informações sobre os solos fundamentais para a geração dos resultados pelo modelo.

Tabela 3 – Tipos e informações básicas dos solos existentes na bacia do Rio Taperoá

| Tipo de solo | Área (km ²) | Área (%) | Descrição |
|---------------------|-------------------------|----------|---|
| Neossolo Litólico | 1994,77 | 35,20 | solo constituído, em grande parte, por fragmentos de rocha maiores que 2 mm, apresentando contato direto entre o horizonte A e o C; normalmente não ultrapassam 50 cm de profundidade |
| Luvissolo | 1458,26 | 25,73 | solo formado por material mineral, compreendendo horizonte B textural com alta saturação de bases e argilas de alta atividade |
| Planossolo | 918,79 | 16,21 | solo apresentando horizonte A ou E seguidos de horizonte B plânico (pouco permeável), constituído por material mineral |
| Neossolo Regolítico | 790,59 | 13,95 | solo com horizonte A sobrejacente ao horizonte C, podendo haver horizonte Bi com espessura menor que 10 cm |
| Neossolo Flúvico | 289,08 | 5,10 | solo originário de sedimento aluvial de caráter flúvico |
| Vertissolo | 131,61 | 2,32 | solo com horizonte vértico variando entre 25 e 100 cm de profundidade e com aspectos texturais insuficientes para caracterizar um horizonte B textural |
| Cambissolo | 84,03 | 1,48 | solo formado por material mineral com horizonte B incipiente abaixo da maioria dos horizontes superficiais |
| Latossolo | 0,33 | 0,01 | solo que apresenta horizonte B latossólico imediatamente abaixo do horizonte A |

Fonte: AESA (2015); EMBRAPA (2006).

Figura 5 – Distribuição espacial dos tipos de solo existentes na bacia do Rio Taperoá

Fonte: Autor (2016).

Os parâmetros de solo exigidos pelo modelo compreendem as propriedades físico-hídricas existentes no solo, como a profundidade da raiz (SOL_ZMX) e dos horizontes (SOL_Z), o grupo hidrológico ao qual o solo pertence (HYDGRP), as porcentagens das partículas que compõem o solo (areia, silte, argila e cascalho), entre outros parâmetros que estão presentes na estrutura do solo. Por não ter sido realizada a coleta das informações dos tipos de solo da bacia do Rio Taperoá em campo foram utilizados dados disponíveis em EMBRAPA (2015) e informações de diversas pesquisas que definiram valores para alguns parâmetros do solo. A Tabela 4 demonstra as informações dos perfis de solo usados neste estudo.

Tabela 4 – Descrição dos perfis utilizados na modelagem

| Nova Classificação | Classificação Antiga | Código do Ponto de Amostragem (PA) | Município |
|---------------------|----------------------|------------------------------------|------------|
| Cambissolo | Cambissolo | 7821 | Taperoá |
| Latossolo | Latossolo | 7593 | Cuité |
| Luvisolo | Bruno não cálcico | 7761 | Monteiro |
| Neossolo Flúvico | Solo Aluvial | 5684 | Patos |
| Neossolo Litólico | Solo Litólico | 7873 | Seridó |
| Neossolo Regolítico | Regossolo | 7878 | Livramento |
| Planossolo | Planossolo | 7839 | Cubati |
| Vertissolo | Vertissolo | 7835 | Sumé |

Fonte: EMBRAPA (2015).

A partir dos dados disponibilizados em EMBRAPA (2015) foi possível organizar os parâmetros de profundidade dos horizontes (SOL_Z), número de horizontes do solo (NLAYERS), porcentagens de areia (SAND), silte (SILT), argila (CLAY) e cascalho (ROCK), carbono orgânico (CBN) e profundidade máxima da raiz (SOL_ZMX), que foi adotado como sendo o valor da profundidade do último horizonte do solo.

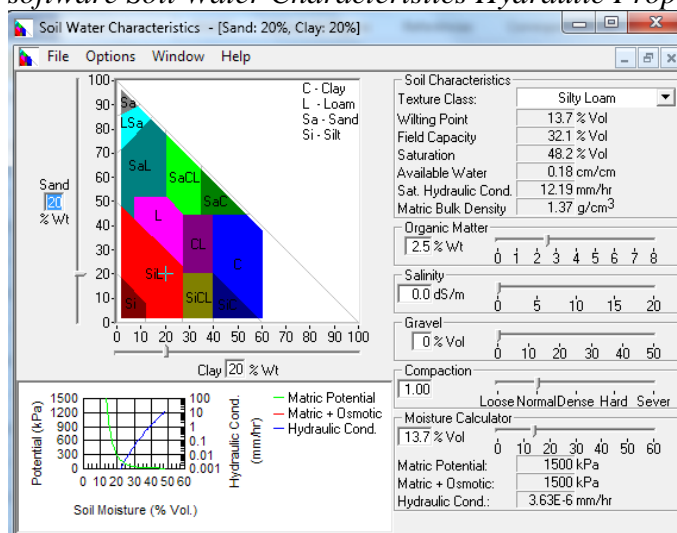
O grupo hidrológico (HYDGRP) corresponde à classe à qual o solo pertence, de acordo com NRCS (2009), a partir do valor de condutividade hidráulica (mm/h) que ele possui, podendo aumentar ou diminuir as taxas de infiltração no solo dependendo do valor. Nessa classificação os solos são organizados em quatro classes distintas: A, B, C e D.

Para a determinação da condutividade hidráulica (SOL_K), utilizada para classificar o grupo hidrológico de cada solo, assim como para a porosidade (ANION_EXCL), pautou-se na proposta de Rawls et al. (1982) que fizeram uma estimativa de algumas propriedades do solo com base na textura a partir de experimentos de campo realizados nos Estados Unidos.

Na capacidade de água disponível no solo (SOL_AWC) utilizaram-se os valores evidenciados por Salter e Williams (1967; 1969) ao estimarem a capacidade de água disponível com base nas características de textura do solo.

No caso da densidade aparente do solo (SOL_BD) esta foi obtida a partir do *software Soil Water Characteristics Hydraulic Properties Calculator* desenvolvido por Saxton e Rawls (2006) para estimar a densidade aparente do solo através de informações sobre a textura do solo, salinidade, compactação, teor de matéria orgânica e presença de cascalho no solo (Figura 6).

Figura 6 – Vista do *software Soil Water Characteristics Hydraulic Properties Calculator*



Fonte: Saxton e Rawls (2006).

Os valores de albedo (SOL_ALB) pautaram-se no estudo de Tsvetsinskaya et al. (2002), que calcularam o albedo para diferentes tipos de solos do norte da África e da Península Arábica, conforme a classificação da *Food and Agriculture Organization of the United Nations* – FAO. Nesse estudo, os autores usaram imagens adquiridas pelo sensor *Moderate Resolution Imaging Spectroradiometer* – MODIS.

Outro parâmetro necessário para a construção do banco de dados de entrada referentes aos tipos de solo é o fator de erodibilidade (USLE_K), sendo entendido como a capacidade de resistência de um solo aos impactos das gotas de chuva. A aquisição desse parâmetro se deu por meio da equação proposta por Williams (1975), em que o fator de erodibilidade é calculado para cada horizonte do solo com base nas porcentagens de areia, silte e argila e na presença de carbono orgânico.

Por fim, a condutividade elétrica (SOL_EC) foi obtida para todos os tipos de solo de acordo com algumas pesquisas que mediram esse parâmetro em campo. Para os solos do tipo Cambissolo, Luvisolo, Neossolo Flúvico, Planossolo e Vertissolo, utilizou-se os valores encontrados por Paes et al. (2013); para o solo do tipo Neossolo Litólico pautou-se em Silva et al. (2014); para o solo do tipo Neossolo Regolítico utilizou-se o valor observado por Lima

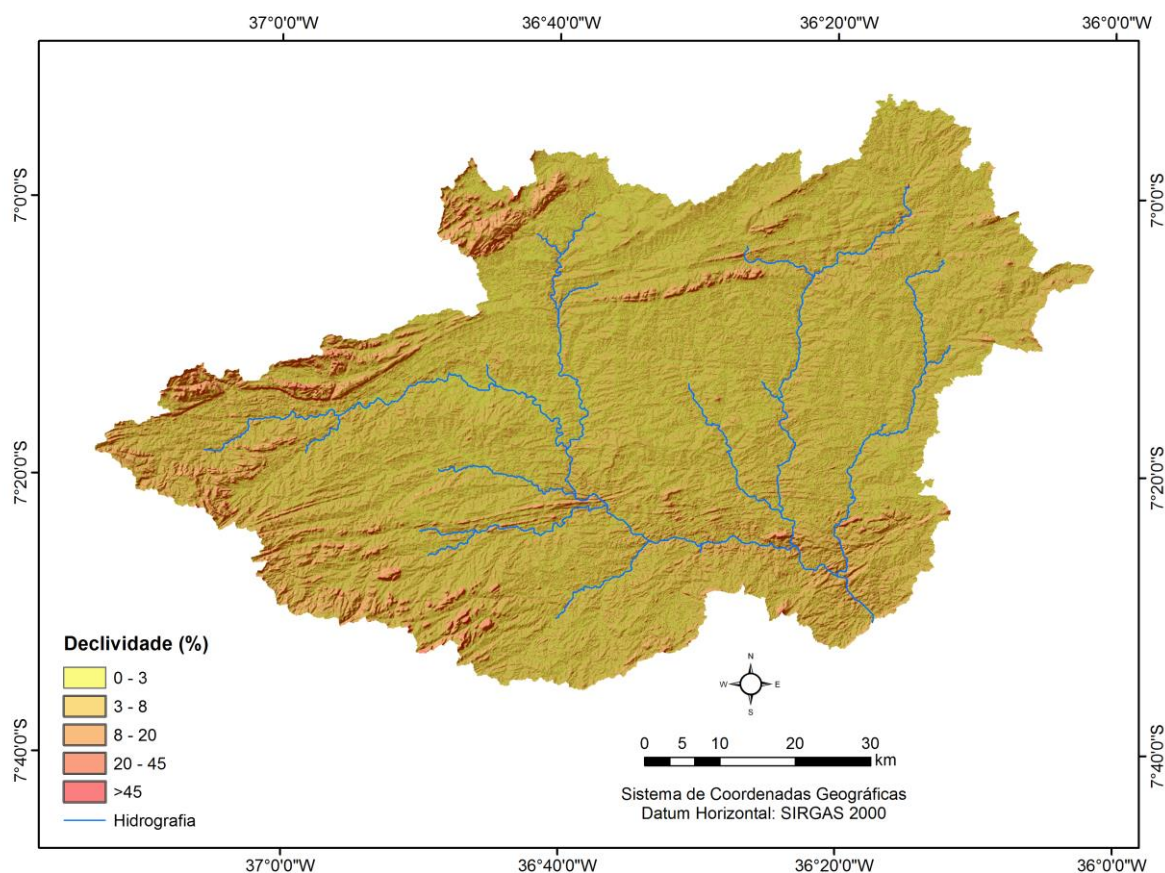
et al. (2013); e para o solo do tipo Latossolo fez-se uso do valor obtido por Machado et al. (2006).

Assim, com base nas informações apresentadas, foi possível construir o banco de dados de entrada referente aos tipos de solo na bacia do Rio Taperoá. É de se ressaltar que apenas o parâmetro de fração de fissuras no solo (SOL_CRK) não foi encontrado na literatura para estes tipos de solo, sendo utilizado o valor *default* do banco de dados do próprio modelo. Os valores dos parâmetros de solo usados na modelagem podem ser vistos no Apêndice A.

4.2.2.3 Declividade

Os últimos dados de entrada necessários para a criação das HRU são as classes de declividade presentes na bacia hidrográfica. Dessa forma, para a bacia do Rio Taperoá, foi adotada a classificação da declividade do terreno proposta por EMBRAPA (1979). Com base nessa classificação foram definidas cinco classes de declividade para a bacia (Figura 7), geradas através do Modelo Digital de Elevação da área.

Figura 7 – Rede de drenagem e classes de declividade definidas para a bacia do Rio Taperoá



Fonte: Autor (2016).

Por fim, após a combinação dos dados de uso do solo, tipos de solo e declividade, o modelo requer que se defina a área mínima da HRU, permitindo que se escolha a opção de área em hectares ou baseado na porcentagem de cada um dos dados de entrada. Assim, foi definida a área mínima em porcentagem, sendo escolhido o valor de 15% para o uso do solo, tipos de solo e declividade. Cada HRU terá uma área de no mínimo 15% da área total dos mapas de uso do solo, tipos de solo e declividade. Foram geradas as HRU para os dois períodos de análise, sendo 700 HRU para o 1º e 567 HRU para o 2º. Salienta-se que as HRU de ambos os períodos possuem o mesmo valor de área mínima. Esta variação do número de HRU se deu devido à alteração do mapa de uso do solo da bacia entre os dois períodos.

4.2.3 Inserção dos dados climáticos

Como último dado de entrada para o início da modelagem o SWAT necessita de dados relacionados às condições climáticas da bacia, a respeito da chuva, temperatura, umidade relativa do ar, velocidade do vento e radiação solar. No entanto, só foi possível coletar os dados diários referentes à precipitação devido à escassez ou inconsistência dos dados diários referentes às demais variáveis. Nesse caso, quando não se tem dados observados em escala diária, o SWAT é capaz de estimar estes valores com base em médias mensais dos parâmetros que não possuem dados diários.

Os dados de precipitação diária foram obtidos junto a ANA (2015) e ao INMET (2015). Nesta pesquisa, fez-se uso de doze postos pluviométricos que compreendem o período de 1970 a 1990 (Tabela 5). A Figura 2 também mostra a localização dos postos.

Tabela 5 – Informações dos postos pluviométricos utilizados neste estudo

| Nome do Posto | Responsável | Código | Latitude (°) | Longitude (°) | Altitude (m) | Falhas |
|------------------------|-------------|--------|--------------|---------------|--------------|--------|
| Coxixola | ANA | 736017 | -7,61 | -36,61 | 465 | 62 |
| Desterro | ANA | 737018 | -7,28 | -37,10 | 590 | 337 |
| Fazenda Bananeiras | ANA | 736026 | -7,51 | -36,96 | 700 | 90 |
| Gurjão | ANA | 736016 | -7,26 | -36,48 | 480 | 337 |
| Juazeirinho | ANA | 736015 | -7,06 | -36,58 | 570 | 366 |
| Pocinhos | ANA | 736014 | -7,06 | -36,06 | 624 | 396 |
| Santa Tereza | ANA | 736006 | -7,11 | -36,41 | 500 | 1096 |
| Santo André | ANA | 736005 | -7,21 | -36,63 | 470 | 1067 |
| São José dos Cordeiros | ANA | 736011 | -7,38 | -36,81 | 610 | 242 |
| Serra Branca | ANA | 736009 | -7,48 | -36,66 | 450 | 214 |
| Soledade | ANA | 736008 | -7,06 | -36,36 | 560 | 307 |
| Taperoá | ANA | 736002 | -7,20 | -36,83 | 500 | 2102 |

Fonte: ANA (2015).

Cabe ressaltar que em todos os postos pluviométricos utilizados no estudo foram encontradas falhas² no monitoramento, dificultando a organização destes para a construção do banco de dados de entrada que o modelo necessita. Contabilizou-se um total de aproximadamente 6600 falhas para a série de 21 anos de dados levando em consideração todos os doze postos de chuva usados.

Dessa forma, para o preenchimento das falhas existentes em todos os postos, utilizou-se o método da ponderação regional, que tem a capacidade de preencher as falhas de um posto com base nos dados de pelo menos três postos vizinhos, com características climáticas semelhantes ao posto que se deseja preencher e com no mínimo dez anos de série de dados (SILVA et al., 2010). O método de ponderação regional é descrito pela Eq. 5:

$$P_x = \frac{1}{3} \left(\frac{M_x}{M_a} P_a + \frac{M_x}{M_b} P_b + \frac{M_x}{M_c} P_c \right) \quad (5)$$

em que P_x a variável correspondente a falha preenchida; M_x a média aritmética do posto com falha; M_a , M_b e M_c a média aritmética dos postos vizinhos; e P_a , P_b e P_c o valor da precipitação dos postos vizinhos para a mesma data do posto com falha.

No caso dos parâmetros climáticos que não possuem dados observados em escala diária utilizaram-se os dados organizados por Carvalho Neto (2011) com base na estação climática presente na Bacia Escola, uma bacia hidrográfica experimental localizada no município de São João do Cariri – PB. Optou-se por estes dados pelo fato da estação climática estar inserida dentro da bacia do Rio Taperoá, portanto representando as características climáticas da região da bacia. Os dados utilizados pelo autor podem ser vistos na Tabela 6.

² Entende-se por falha a ausência do dado para o respectivo dia de coleta. Estas falhas podem ocorrer por meio da não coleta do dado pelo técnico, por erro no momento da transposição dos dados do formato físico para o formato digital ou outra situação que tenha contribuído para que o dado não esteja representado na série temporal.

Tabela 6 – Valores das médias mensais para os parâmetros climatológicos utilizados na estimativa dos valores diários neste estudo: relacionados à temperatura (TMPMX; TMPMN; TMPSTDMX; TMPSTDMN), precipitação (PCPMM; PCPSTD; PCPSKW; PR_W1; PR_W2; PCPD, RAINHHMX), radiação solar (SOLARAV), velocidade do vento (WNDV) e umidade relativa do ar (DEWPT)

| Parâmetro/Mês | Jan | Fev | Mar | Abr | Mai | Jun | Jul | Ago | Set | Out | Nov | Dez |
|---------------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|
| TMPMX | 32,8 | 33,2 | 32,8 | 31,8 | 30,6 | 29,8 | 28,9 | 29,5 | 31,0 | 32,2 | 32,5 | 32,1 |
| TMPMN | 21,0 | 20,9 | 20,9 | 20,7 | 20,3 | 18,8 | 17,9 | 17,9 | 19,1 | 19,6 | 20,1 | 20,2 |
| TMPSTDMX | 3,4 | 3,7 | 3,3 | 3,0 | 3,4 | 3,3 | 3,2 | 3,4 | 3,4 | 3,3 | 3,5 | 4,6 |
| TMPSTDMN | 1,1 | 1,8 | 1,3 | 1,3 | 1,4 | 1,3 | 1,9 | 1,3 | 2,3 | 1,1 | 1,1 | 2,0 |
| PCPMM | 60,0 | 58,1 | 70,1 | 64,7 | 39,4 | 33,6 | 26,0 | 19,3 | 7,3 | 4,2 | 6,3 | 33,0 |
| PCPSTD | 9,2 | 8,5 | 7,9 | 9,2 | 5,0 | 3,9 | 2,7 | 2,1 | 1,5 | 1,8 | 3,0 | 6,8 |
| PCPSKW | 6,6 | 5,9 | 5,2 | 8,3 | 7,6 | 7,3 | 5,0 | 4,5 | 9,6 | 21,7 | 21,4 | 9,2 |
| PR_W1 | 0,1 | 0,1 | 0,2 | 0,2 | 0,2 | 0,2 | 0,2 | 0,1 | 0,1 | 0,0 | 0,0 | 0,1 |
| PR_W2 | 0,4 | 0,5 | 0,5 | 0,4 | 0,4 | 0,5 | 0,4 | 0,4 | 0,4 | 0,2 | 0,2 | 0,4 |
| PCPD | 4,5 | 5,2 | 7,3 | 8,0 | 7,0 | 8,9 | 8,8 | 6,1 | 2,5 | 1,0 | 1,6 | 2,6 |
| RAINHHMX | 30,5 | 25,5 | 26,6 | 42,2 | 21,0 | 18,7 | 7,7 | 5,5 | 1,6 | 2,3 | 0,5 | 7,3 |
| SOLARAV | 39,5 | 35,9 | 38,6 | 36,5 | 32,5 | 29,0 | 31,1 | 35,0 | 39,8 | 42,4 | 41,7 | 40,7 |
| WNDV | 2,3 | 2,0 | 1,8 | 1,7 | 1,7 | 1,6 | 1,8 | 2,1 | 2,5 | 2,8 | 2,8 | 2,4 |
| DEWPT | 20,1 | 20,1 | 20,2 | 20,0 | 20,0 | 16,7 | 18,3 | 18,0 | 18,4 | 18,7 | 19,4 | 19,4 |

Fonte: Carvalho Neto (2011).

Após o fornecimento dos dados climáticos o modelo está apto a gerar os primeiros resultados para os processos que se deseje analisar, como vazão e produção de sedimentos, por exemplo. Contudo, os resultados preliminares obtidos pelo modelo geralmente não apresentam um bom ajuste entre os dados observados e simulados. A avaliação do desempenho do modelo é feita através da aplicação de coeficientes estatísticos que medem o grau de ajuste entre os dados simulados e observados.

4.3 Análise de desempenho do modelo

Para avaliar a consistência dos resultados iniciais apresentados pelo SWAT foram realizados testes estatísticos a fim de verificar se a simulação da vazão está se ajustando aos dados observados. Desse modo, pautou-se no Coeficiente de Eficiência – COE (Nash e Sutcliffe, 1970) e no Coeficiente de Determinação de Pearson (R^2) para analisar o desempenho do modelo.

O COE verifica o comportamento entre os dados estimados e os dados observados, podendo variar de $-\infty$ (infinito negativo) a 1, em que $\text{COE} = 1$ indica um ajuste perfeito entre os dados. Este coeficiente é calculado pela Eq. 6:

$$COE = 1 - \left(\frac{\sum_{i=1}^n (E_m - E_s)^2}{\sum_{i=1}^n (E_m - \overline{E_s})^2} \right) \quad (6)$$

em que E_m é o evento observado; E_s o evento estimado pelo modelo; $\overline{E_s}$ a média do evento observado no período de simulação; e n o número de eventos existentes no período de simulação.

A estatística de desempenho R^2 calcula a relação linear entre duas variáveis (nesse caso os dados de vazão observados e simulados), também variando de $-\infty$ (infinito negativo) a 1 (associação perfeita), sendo obtido pela Eq. 7:

$$R^2 = \left(\frac{\sum_{i=1}^n (y_i - y_m)(x_i - x_m)}{\sqrt{\sum_{i=1}^n (y_i - y_m)^2 \sum_{i=1}^n (x_i - x_m)^2}} \right)^2 \quad (7)$$

sendo x_i os valores observados; x_m a média dos valores observados; y_i os valores calculados pelo modelo; y_m a média dos valores calculado pelo modelo; e n o número de eventos.

Os resultados preliminares de vazão gerados pelo SWAT foram comparados com os dados de vazão monitorados em estação fluviométrica. A bacia do Rio Taperoá dispõe de um posto fluviométrico ao longo de sua extensão (Tabela 7), o qual possui dados observados de vazão para o período estudado (1970 a 1990). A Figura 2 também apresenta a localização do posto fluviométrico.

Tabela 7 – Informações do posto fluviométrico utilizado neste estudo

| Nome do Posto | Tipo | Código | Latitude (°) | Longitude (°) | Altitude (m) |
|----------------|---------------|----------|--------------|---------------|--------------|
| Poço de Pedras | Fluviométrico | 38850000 | -7,39 | -36,43 | 430 |

Fonte: ANA (2015).

Ressalta-se que a comparação dos dados observados e simulados para verificar o grau de desempenho do modelo só foi realizada para a vazão tomando por base os resultados encontrados na sub-bacia 29 (Figura 4). Escolheu-se esta sub-bacia para a análise das simulações da vazão por se tratar da sub-bacia em que o posto fluviométrico está inserido.

O ajuste da produção de sedimentos não pôde ser feito por não haver dados de sedimentos disponíveis para a bacia do Rio Taperoá, impossibilitando a comparação entre os dados simulados pelo modelo e os dados observados para esse processo.

Devido os primeiros resultados gerados pelo SWAT não terem apresentado um bom ajuste em comparação com os dados observados de vazão fez-se a calibração do modelo com

o objetivo de melhorar o seu desempenho perante a simulação da vazão na bacia, como será apresentado a seguir.

4.4 Calibração do SWAT

Como mencionado, após a aplicação dos métodos estatísticos e a verificação de que os resultados ainda não apresentam bom ajuste em relação aos dados observados foi realizada a calibração do modelo para que se buscassem resultados satisfatórios na simulação da vazão. Com isso, a calibração foi realizada para os parâmetros que mais influenciaram diretamente no escoamento superficial a partir do método de autocalibração SUFI-2, desenvolvido por Abbaspour et al. (2007), em que utiliza-se o *software* de domínio público SWAT-CUP no processo de calibração automática. Vale salientar que a calibração foi realizada levando em consideração apenas os dados observados de vazão do posto fluviométrico Poço de Pedras, pois não existem dados relacionados à sedimentos na bacia.

A utilização do SWAT-CUP permitiu a calibração dos parâmetros, bem como a análise de sensibilidade destes, através do algoritmo SUFI-2 – *Sequential Uncertainty Fitting* (ABBASPOUR et al., 2004; 2007), revelando os valores dos parâmetros que mais se ajustaram à dinâmica natural da bacia. Neste estudo, foram utilizados 19 parâmetros para a calibração do modelo, visto que estes parâmetros influenciam diretamente no escoamento superficial para as condições das bacias existentes no Nordeste brasileiro (SANTOS, 2015)³. Os parâmetros utilizados na calibração podem ser observados na Tabela 8.

³ A utilização dos 19 parâmetros foi realizada com base na indicação do professor Raghavan Srinivasan (Texas A&M University) ao autor citado em um curso sobre a aplicação do modelo SWAT realizado em Recife-PE no ano de 2014.

Tabela 8 – Parâmetros relacionados ao escoamento superficial utilizados na calibração do modelo SWAT

| Parâmetros | Descrição |
|------------|--|
| Alpha_Bf | Fator de recessão de escoamento de base (dias) |
| Biomix | Eficiência da mistura biológica do solo (adimensional) |
| Canmx | Quantidade máxima de água interceptada pela vegetação (mm) |
| Cn2 | Valor da curva número para a condição de solo úmido (adimensional) |
| Ch_K2 | Condutividade hidráulica efetiva do canal (mm/h) |
| Ch_N2 | Coeficiente de Manning do canal (adimensional) |
| Epc | Coeficiente de compensação da absorção de água pelas plantas (adimensional) |
| Esco | Coeficiente de compensação da evaporação de água no solo (adimensional) |
| Gw_delay | Tempo de recarga do aquífero (dias) |
| Gw_revap | Coeficiente de controle do fluxo da água entre as zonas saturada e não saturada (adimensional) |
| Gw_qmn | Profundidade da água subterrânea necessária para ocorrer fluxo de retorno (mm) |
| Rchrg_Dp | Fração de água percolada para o aquífero profundo (fração) |
| Revapmn | Limite de água no solo para que ocorra ascensão capilar na zona saturada (mm) |
| Slsbbsn | Comprimento da declividade média (m) |
| Sol_Alb | Albedo do solo (adimensional) |
| Sol_Awc | Capacidade de armazenamento de água no solo (mm/mm) |
| Sol_K | Condutividade hidráulica saturada do solo (mm/h) |
| Sol_Z | Profundidade da camada de solo (mm) |
| Surlag | Tempo de retardo de escoamento superficial (dias) |

Fonte: Autor (2016).

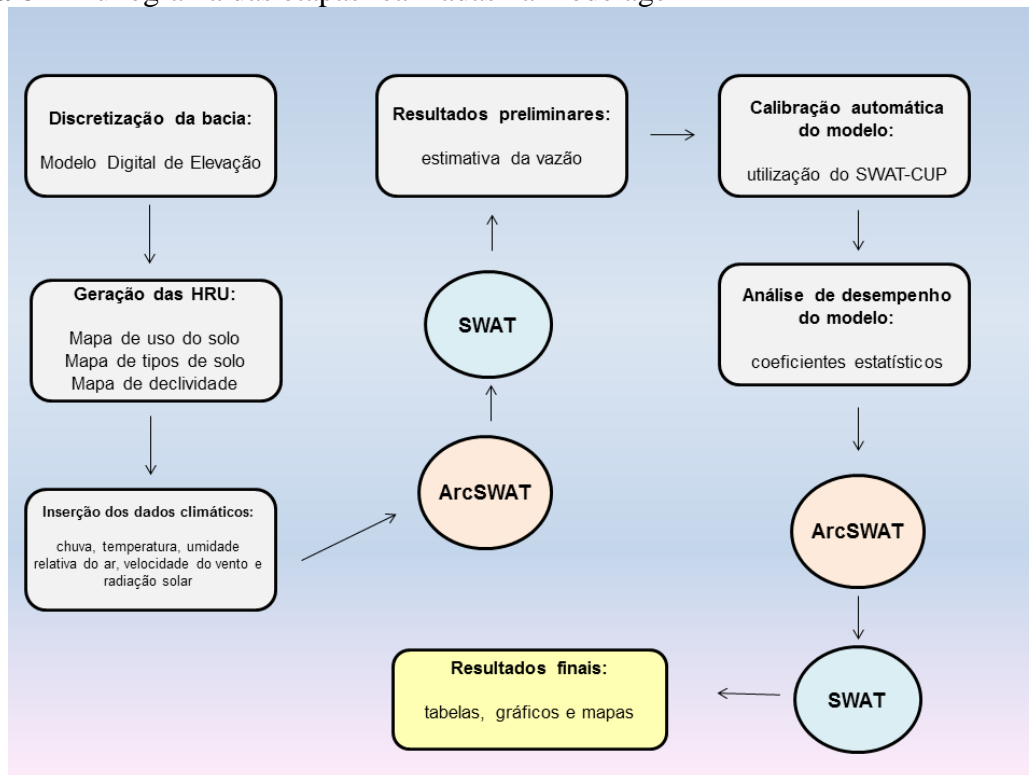
Para a calibração dos parâmetros do modelo foram realizadas 500 iterações, sendo que a cada iteração os valores de cada parâmetro eram modificados simultaneamente, o que agiliza o processo de calibração. A cada iteração, o algoritmo também compara o ajuste encontrado entre os dados observados e os simulados a partir da modificação nos valores dos parâmetros e calcula os índices estatísticos que revelam o desempenho da iteração. Ao final da calibração são mostrados para cada iteração: (a) os valores de cada parâmetro, (b) os valores calculados para os índices estatísticos, (c) os valores simulados para a variável indicada (nesse caso a vazão) e (d) a iteração que apresentou o melhor ajuste.

Após a calibração dos parâmetros do modelo no SWAT-CUP é necessário retornar ao ArcSWAT para a inserção dos valores calibrados para os parâmetros escolhidos na calibração, neste caso os parâmetros relacionados ao escoamento superficial.

A partir da execução do modelo com os novos valores dos parâmetros calibrados chega-se aos resultados finais da modelagem. Os resultados disponibilizados pelo SWAT podem ser organizados nas formas de tabelas, gráficos e mapas, dependendo da necessidade

do estudo do pesquisador. A Figura 8 apresenta um fluxograma das etapas seguidas neste trabalho para a obtenção dos resultados finais através da modelagem hidrossedimentológica.

Figura 8 – Fluxograma das etapas realizadas na modelagem



Fonte: Autor (2016).

4.5 Visita de campo

Foi realizada uma visita de campo em um ponto da bacia do Rio Taperoá com o objetivo de compreender melhor os aspectos paisagísticos da área, como geomorfologia, solos, vegetação, uso do solo e geologia, e assim auxiliar nas análises referentes ao comportamento do escoamento superficial e da produção de sedimentos.

O trabalho de campo realizou-se em novembro de 2014 e também teve o intuito de verificar a existência de alguma prática de conservação do solo nas propriedades rurais do município de Cabaceiras, localizado na região do Cariri Paraibano e inserido na bacia do Rio Taperoá. A atividade ocorreu vinculada ao trabalho de campo da disciplina de Geografia dos Solos do curso de Geografia da Universidade Federal da Paraíba.

5 RESULTADOS E DISCUSSÃO

5.1 Mudanças no uso do solo da bacia do Rio Taperoá

O estudo preocupou-se em analisar as mudanças promovidas no uso do solo da bacia do Rio Taperoá entre 1970 e 1990 com o objetivo de verificar se estas modificações influenciaram o comportamento dos processos hidrossedimentológicos na bacia; se o aumento ou diminuição de determinada área causou algum impacto na paisagem que possa ter rebatimentos diretos na vazão e na erosão.

A Tabela 9 mostra as principais mudanças no uso do solo identificadas na bacia em termos de área para todo o período estudado. Destaca-se uma notável diminuição da classe de Vegetação Arbustiva e um significativo aumento da classe de Vegetação Arbórea/Arbustiva ao longo do tempo.

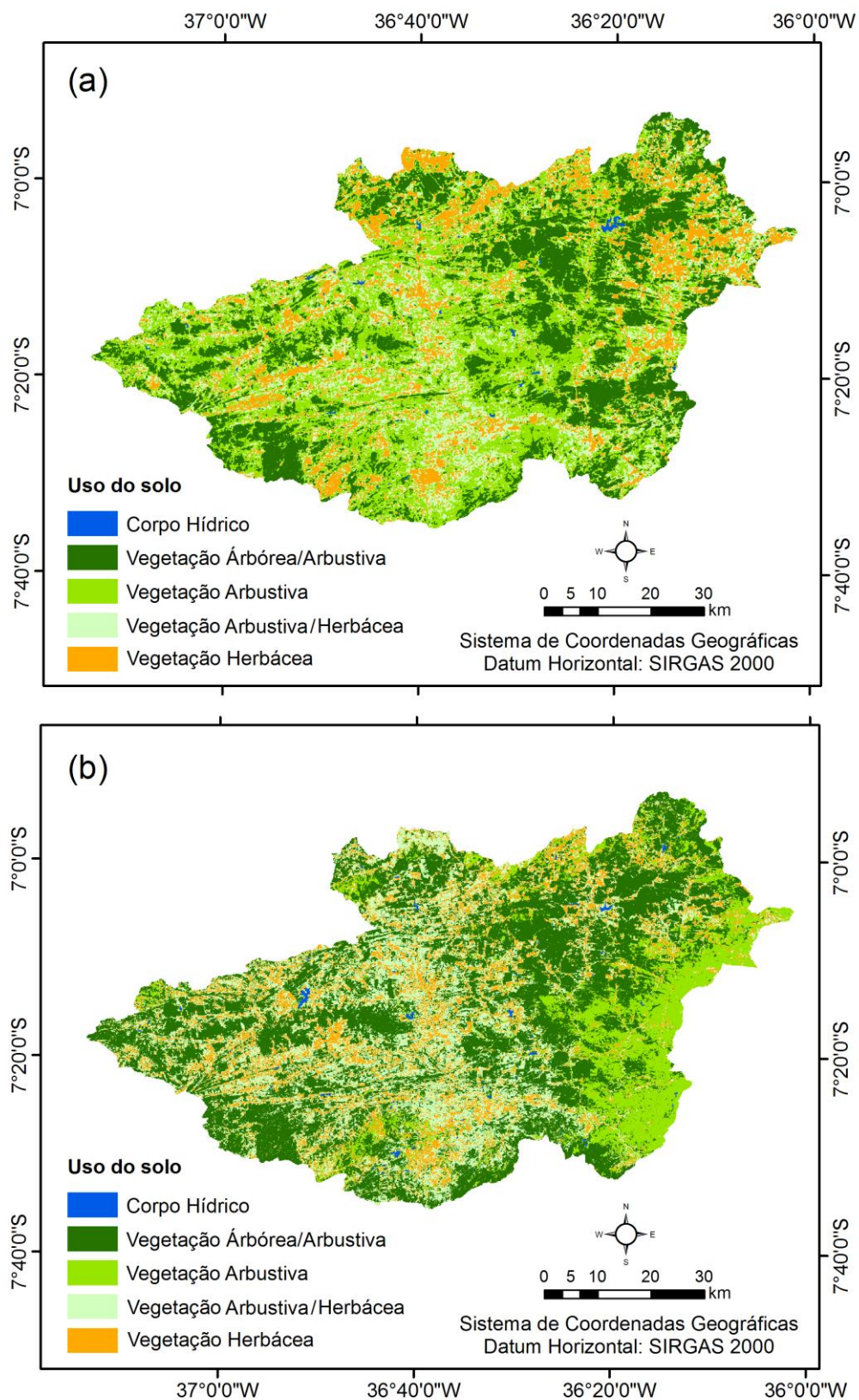
Tabela 9 – Classes de uso do solo e respectivas áreas para os períodos de 1970 a 1980 e 1981 a 1990 na bacia do Rio Taperoá

| Uso do solo | 1º período | | 2º período | | Variação | |
|------------------------------|-------------------------|----------|-------------------------|----------|-------------------------|----------|
| | Área (km ²) | Área (%) | Área (km ²) | Área (%) | Área (km ²) | Área (%) |
| Corpo Hídrico | 18,02 | 0,32 | 23,41 | 0,41 | +5,38 | +0,11 |
| Vegetação Arbórea/Arbustiva | 1677,21 | 29,60 | 2532,72 | 44,71 | +855,51 | +15,11 |
| Vegetação Arbustiva | 2052,32 | 36,23 | 822,54 | 14,52 | -1229,78 | -21,71 |
| Vegetação Arbustiva/Herbácea | 1061,45 | 18,74 | 1488,79 | 26,28 | +427,34 | +7,54 |
| Vegetação Herbácea | 856,37 | 15,12 | 797,92 | 14,08 | -58,45 | -1,04 |
| Total | 5665,38 | 100 | 5665,38 | 100 | – | – |

Fonte: Autor (2016).

Na Figura 9 é possível visualizar as classificações do uso do solo na bacia do Rio Taperoá para os dois períodos analisados. Nota-se, inicialmente, que além da diminuição da área de Vegetação Arbustiva também houve uma concentração dessa classe na porção leste da bacia. As áreas de Vegetação Arbórea/Arbustiva expandiram-se próximas aos locais onde já existia essa classe, com destaque para as porções nordeste e oeste da bacia. Também percebe-se que as áreas de Vegetação Arbustiva na porção central da bacia foram substituídas pela classe de Vegetação Arbustiva/Herbácea e Vegetação Herbácea.

Figura 9 – Classificação do uso do solo na bacia do Rio Taperoá para: (a) 1º período e (b) 2º período



Fonte: Autor (2016).

Deve-se levar em consideração na análise das mudanças no uso do solo da bacia as datas das imagens utilizadas, as quais foram coletadas em meses diferentes, onde pode ter havido influência das chuvas em período anterior à data da obtenção das imagens e, conseqüentemente, esse fato tenha influenciado na resposta que o sensor teve em relação à tonalidade da vegetação da região: na imagem de 02/08/1980 foram registrados 525 mm de precipitação dois meses antes; na imagem de 09/10/1981 foram registrados apenas 18 mm dois meses antes; e na imagem de 18/06/1990 foram registrados 550 mm de precipitação dois meses antes dessa data.

Portanto, dependendo do comportamento da vegetação em relação à disponibilidade de água para sua manutenção, pode-se auferir que as chuvas acumuladas registradas em um período de dois meses antes da data de coleta das imagens influenciaram na tonalidade da vegetação e, por conseguinte, na resposta que o sensor teve. Também vê-se que a imagem de 18/06/1990 está inserida em um período do ano de maior umidade (levando-se em consideração a precipitação e a temperatura) em relação as duas imagens restantes, que estão inseridas no período mais seco do ano para a bacia do Rio Taperoá.

A vegetação do tipo Caatinga é a principal característica da paisagem na região do Cariri Paraibano. Esse tipo de vegetação apresenta uma diversidade de espécies que variam entre bromélias (macambira, caroá), cactáceas (xique-xique, facheiro, mandacaru), euforbiáceas (marmeleiro, velame, pinhão bravo), leguminosas (catingueira, jurema-preta, mulungu), entre outras. Observa-se que os aspectos paisagísticos encontrados na bacia do Rio Taperoá variam de acordo com as características do ambiente, desde as características naturais quanto sociais (SOUZA, 2008; TRAVASSOS, 2012).

As áreas onde a vegetação apresenta-se com aspecto denso são indicativas de pouco uso feito por atividades humanas, como extração de lenha ou desmatamento para implantação de lavoura. A densidade da vegetação nessas áreas também está ligada à declividade e a presença de corpos rochosos na superfície do solo, os quais podem impossibilitar o uso do terreno para alguma atividade socioeconômica.

Já nas áreas onde o uso da terra já foi submetido a algum tipo de exploração, seja para implantação de lavoura, criação de pasto, extração de lenha, entre outros, a vegetação apresenta-se esparsa, com pouca cobertura superficial, favorecendo processos de erosão e a desertificação. A ocorrência destes processos geram dificuldades para a recuperação da vegetação nessas áreas, necessitando de práticas complexas de manejo da terra, as quais exigem grande quantidade de recursos, tanto financeiros quanto de tempo.

Estas características do uso do solo da bacia foram constatadas em visita de campo, realizada em novembro de 2014, no município de Cabaceiras-PB. A Figura 10 mostra um exemplo de uma paisagem comum na região do Cariri Paraibano indicando as classes utilizadas na classificação que representam o uso do solo da bacia.

Figura 10 – Vista da paisagem típica da região do Cariri Paraibano, no município de Cabaceiras-PB



Fonte: Autor (2014).

As modificações identificadas no uso do solo da bacia do Rio Taperoá entre 1970 e 1990 são reflexos das dinâmicas naturais e socioeconômicas existentes na região. São estas modificações que influenciam diretamente na erosão, no escoamento superficial, na desertificação, entre outros processos associados às alterações promovidas pelas atividades humanas no ambiente.

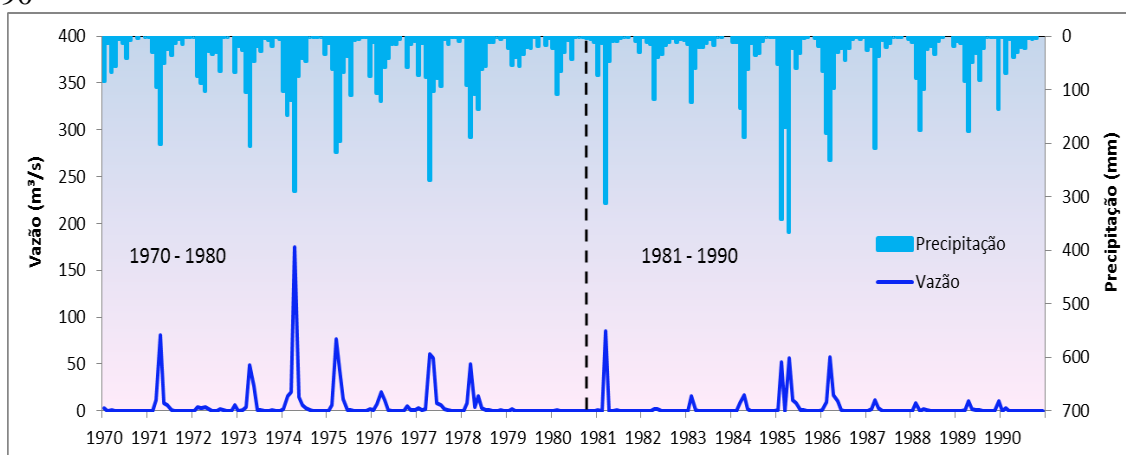
5.2 Análise do comportamento da vazão

A região do Cariri Paraibano se caracteriza por sua condição climática de semiárido, com irregularidades na distribuição das chuvas em escala espacial e temporal, altos graus de insolação, temperaturas acima de 25°C, entre outros fatores que condicionam a dinâmica dos processos físicos nesse espaço. Nesse caso, o caráter de variabilidade da precipitação é o principal agente climático responsável pelo comportamento da vazão e da erosão na região,

controlando, principalmente, os períodos em que estes processos apresentam um comportamento estável ou anômalo.

A bacia do Rio Taperoá frequentemente registra valores iguais ou próximos a $0,0 \text{ m}^3/\text{s}$ no posto fluviométrico Poço de Pedras, sobretudo no período seco, devido a bacia ser composta por rios intermitentes e efêmeros. Este quadro é reflexo da irregularidade da distribuição anual das chuvas na bacia, que concentra a maior parte da precipitação entre os meses de Fevereiro e Abril (64% do total anual). Isso implica dizer que a ocorrência da vazão na bacia segue o mesmo comportamento da precipitação, sendo a vazão registrada apenas nos meses em que chove (Figura 11).

Figura 11 – Hidrograma e ietograma observados para a bacia do Rio Taperoá entre 1970 e 1990



Fonte: Autor (2016).

Desse modo, o modelo SWAT simulou a vazão para a bacia do Rio Taperoá levando em consideração os dois períodos de análise do uso do solo: (a) 1970 a 1980 (1º período); e (b) 1981 a 1990 (2º período). Inicialmente destacou-se a brusca diminuição da taxa de vazão média registrada pelo posto fluviométrico no 2º período em relação ao 1º período: entre 1970 e 1980 a vazão média observada registrava $6,56 \text{ m}^3/\text{s}$ e entre 1981 e 1990 a vazão média observada foi de $3,48 \text{ m}^3/\text{s}$, ou seja, um decréscimo de 53% no valor médio da vazão ao longo do tempo.

Em se tratando da modelagem, o SWAT apresentou resultados satisfatórios na estimativa da vazão para ambos os períodos na bacia do Rio Taperoá conforme Moriasi et al. (2007). No 1º período o modelo superestimou a vazão média observada, obtendo um valor de $8,39 \text{ m}^3/\text{s}$, isto é, $1,82 \text{ m}^3/\text{s}$ acima da média observada. Para este mesmo período os coeficientes estatísticos de desempenho do modelo apresentaram um bom ajuste quando comparados os valores observados e simulados, sendo $\text{COE} = 0,81$ e $R^2 = 0,83$. Para o 2º

período notou-se um pequeno decréscimo no desempenho do modelo no tocante ao ajuste dos dados observados e estimados: $COE = 0,70$ e $R^2 = 0,70$.

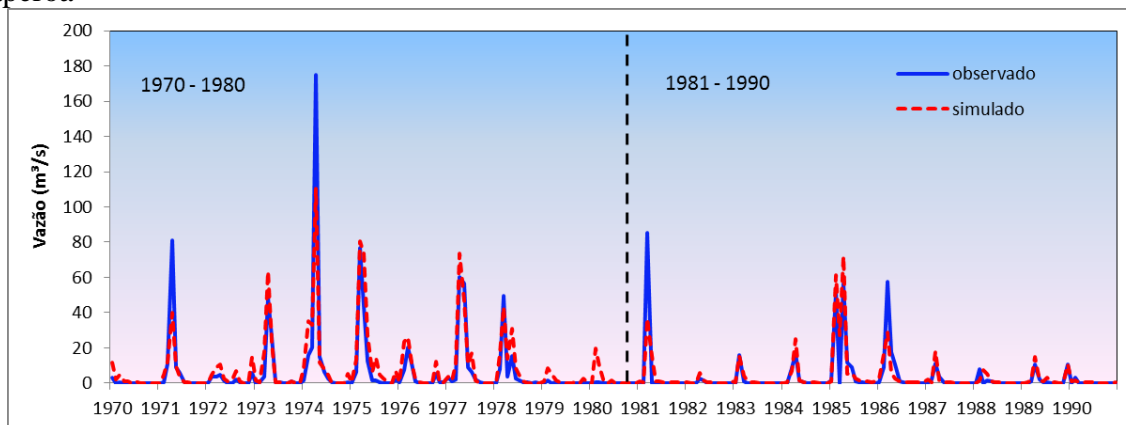
Contudo, a vazão média simulada mostrou-se bastante próxima da vazão média observada, com o valor de $3,67 \text{ m}^3/\text{s}$, ou seja, uma diferença de apenas $0,19 \text{ m}^3/\text{s}$. De acordo com Moriasi et al. (2007), o ajuste apresentado pelo SWAT é classificado como “muito bom” no 1º período (0,75 a 1,0) e “bom” no 2º período (0,65 a 0,75). A Tabela 10 mostra um resumo dos resultados obtidos com a modelagem da vazão e a Figura 12 mostra o comportamento das vazões médias observada e simulada.

Tabela 10 – Principais resultados encontrados na modelagem da vazão

| Estatísticas da modelagem | 1970 a 1980 | 1981 a 1990 |
|---------------------------------|------------------------------|-----------------------------|
| Média observada | $6,56 \text{ m}^3/\text{s}$ | $3,48 \text{ m}^3/\text{s}$ |
| Média simulada (sem calibração) | $11,55 \text{ m}^3/\text{s}$ | $9,84 \text{ m}^3/\text{s}$ |
| Média simulada (pós-calibração) | $8,39 \text{ m}^3/\text{s}$ | $3,67 \text{ m}^3/\text{s}$ |
| COE (sem calibração) | 0,44 | -1,32 |
| COE (pós-calibração) | 0,81 | 0,70 |
| R^2 (sem calibração) | 0,56 | 0,60 |
| R^2 (pós-calibração) | 0,83 | 0,70 |

Fonte: Autor (2016).

Figura 12 – Comportamento das vazões médias observada e simulada para a bacia do Rio Taperoá



Fonte: Autor (2016).

Com base na Figura 12 notou-se que o SWAT se ajustou satisfatoriamente ao comportamento da vazão observada. O modelo não foi capaz de estimar com aproximação os picos de vazão nos anos de 1971, 1974, 1981 e 1986. Também foi possível observar na Figura 12 uma diminuição do número de picos de vazão registradas no 2º período; vê-se que no 1º período ocorreram mais picos e com valores mais elevados do que no 2º período, contribuindo, também, para o decréscimo da média observada no segundo período.

Existem três fatores principais que podem explicar a diminuição da vazão média observada no 2º período em relação ao 1º período: a) erro na coleta do dado de vazão; b) diminuição dos totais pluviométricos na bacia; e c) construção de reservatórios no 2º período.

O erro na coleta do dado pode ter sido devido ao fato da ocorrência de um volume muito grande de água no canal onde são registrados os dados de vazão, impossibilitando o técnico de coletar a informação correta do evento.

A diminuição dos totais pluviométricos na bacia também é uma hipótese que pode estar relacionada à diminuição da vazão média observada. De acordo com a média anual de chuva por período, no 1º a precipitação anual foi de 528 mm e no 2º foi de 493 mm, ou seja, uma diminuição de 35 mm. Contudo, um decréscimo dessa quantidade de chuva ao longo da série temporal talvez não possa causar uma diminuição tão brusca na vazão em um espaço de tempo relativamente curto.

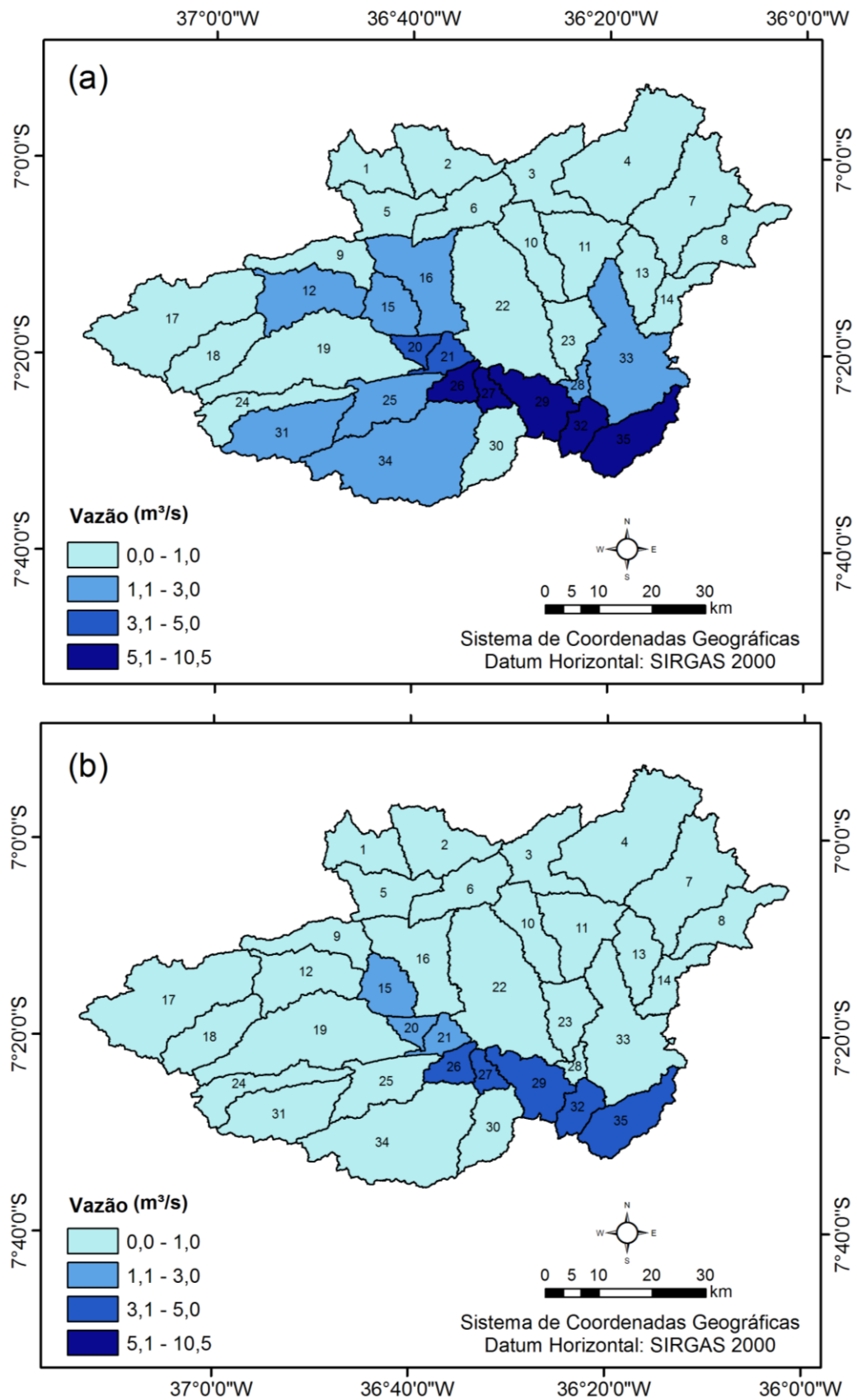
Outra possibilidade para a explicação da diminuição da vazão média no 2º período é a construção de reservatórios na bacia nesse período. Com a construção dos reservatórios (de pequeno e médio porte) parte da vazão do rio pode ter sido interceptada ao longo da rede de drenagem, fazendo com que o volume escoado não pudesse ter sido registrado no posto fluviométrico, registrando, assim, valores de vazão inferiores aos valores registrados no primeiro período. Todavia, também é preciso que sejam utilizadas metodologias específicas que possam explicar este comportamento da vazão com maior grau de segurança.

A vazão simulada também apresentou um comportamento diferente em escala espacial quando comparados os dois períodos em análise (Figura 13). Novamente, as taxas de vazão diminuem no 2º período, onde algumas sub-bacias passaram a apresentar valores menores. No entanto, também é possível observar um padrão na distribuição da vazão ao longo da bacia: a) basicamente as áreas que apresentam as menores vazões são exatamente aquelas onde as sub-bacias não possuem contribuição de nenhuma outra sub-bacia, com algumas exceções; b) as sub-bacias que possuem os maiores valores de vazão acompanham o percurso do rio principal (Rio Taperoá), a exemplo das sub-bacias 20, 21, 26, 27, 29, 32 e 35.

O uso do solo também possui influência no comportamento da vazão na bacia, sendo que na porção nordeste, onde são estimados os menores valores de vazão na bacia, a cobertura superficial promovida pela classe de Vegetação Arbórea/Arbustiva contribui com a diminuição da velocidade da enxurrada por meio da interceptação das gotas de chuva, proporcionando, ao mesmo tempo, a infiltração da água no solo (BERTONI e LOMBARDI NETO, 2010). Nessa porção da bacia também são registrados os menores totais pluviométricos, contribuindo, também, com as baixas taxas de vazão.

Na porção central da bacia, mais precisamente nas áreas onde estão localizadas as sub-bacias que apresentam as maiores taxas de vazão, a classe de Vegetação Herbácea (que também compreende áreas de solo exposto) influencia no aumento do escoamento por deixar o terreno com menos proteção de cobertura superficial, o que favorece a enxurrada. Também observa-se que nessa porção da bacia existem áreas com declividades elevadas, as quais contribuem para o aumento da velocidade do escoamento, além de estar acumulando a vazão que se origina nas sub-bacias das áreas de nascentes.

Figura 13 – Distribuição espacial da vazão estimada na bacia do Rio Taperoá, para: (a) 1º período e (b) 2º período



Fonte: Autor (2016).

Este panorama do comportamento da vazão na bacia do Rio Taperoá ao longo de toda a série estudada foi obtido através das simulações feitas pelo modelo após a calibração dos parâmetros que possuem influência neste processo. A seguir serão apresentados os resultados da calibração dos parâmetros utilizados na modelagem, com o intuito de verificar quais possuem maior e menor sensibilidade em relação ao escoamento superficial na bacia.

5.2.1 Análise de sensibilidade dos parâmetros utilizados na modelagem

A análise de sensibilidade consiste em verificar quais os parâmetros mais sensíveis para as condições ambientais da bacia em estudo, identificando a que fenômeno estes parâmetros estão relacionados, tais como evapotranspiração, umidade relativa do ar, crescimento das plantas, infiltração, entre outros.

A sensibilidade dos parâmetros foi avaliada após a calibração destes através do SWAT-CUP, o qual exibe os valores calibrados dos parâmetros para simulação do escoamento superficial que mostrou o melhor ajuste. A Tabela 11 expõe os valores calibrados dos 19 parâmetros utilizados no processo de calibração do modelo.

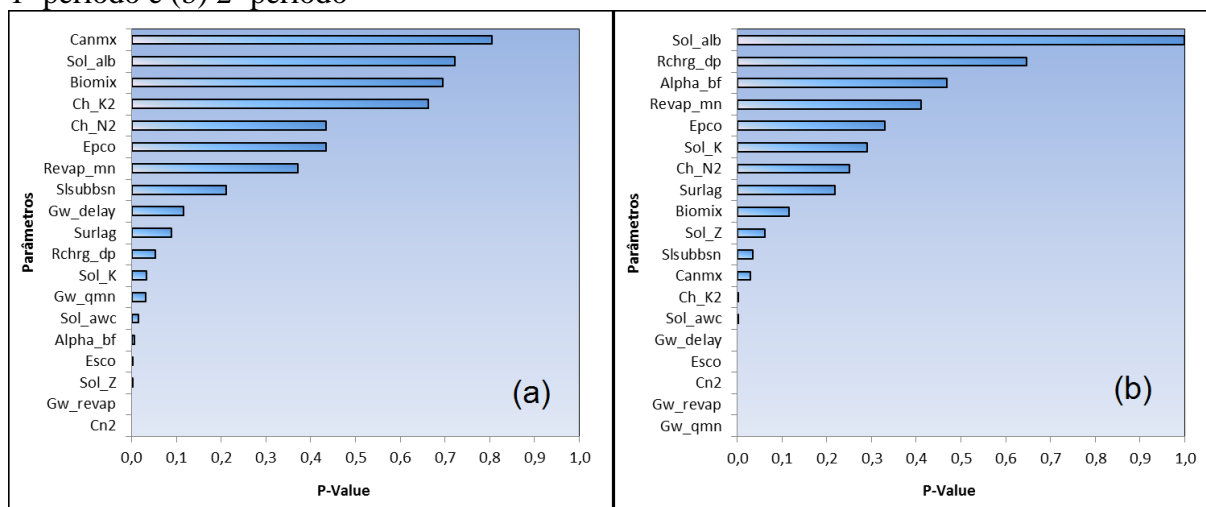
Tabela 11 – Valores calibrados dos parâmetros utilizados na calibração do SWAT

| Parâmetro | Operação | Valor para o 1º período | Valor para o 2º período |
|-----------|---------------|-------------------------|-------------------------|
| Alpha_bf | Substituição | 0,717 | 0,523 |
| Biomix | Substituição | 0,823 | 0,473 |
| Canmx | Substituição | 4,205 | 2,633 |
| Cn2 | Multiplicação | 1,0946 | 0,9062 |
| Ch_K2 | Substituição | 0,085 | 1,165 |
| Ch_N2 | Substituição | 0,2955 | 0,0747 |
| Epc0 | Substituição | 0,055 | 0,875 |
| Esco | Substituição | 0,9425 | 0,6795 |
| Gw_delay | Adição | 45,840003 | 33,270004 |
| Gw_revap | Substituição | 0,15554 | 0,15806 |
| Gw_qmn | Substituição | 521 | 365 |
| Rchrg_dp | Multiplicação | 0,96171 | 0,99933 |
| Revapmn | Substituição | 7,57 | 8,349999 |
| Slsbbsn | Multiplicação | 0,7565 | 0,7855 |
| Sol_alb | Multiplicação | 0,8715 | 1,0915 |
| Sol_awc | Multiplicação | 1,1915 | 1,0765 |
| Sol_K | Multiplicação | 1,0775 | 0,9445 |
| Sol_Z | Multiplicação | 1,1045 | 0,7775 |
| Surlag | Substituição | 13,512 | 20,040001 |

Fonte: Autor (2016).

Para identificar a sensibilidade dos parâmetros o SWAT-CUP utiliza duas funções que determinam quão sensível cada parâmetro é: 1) *t-stat*, que expõe a medida da sensibilidade, em que quanto maior for o valor do parâmetro mais sensível ele é; e 2) *p-value*, determinando a significância da sensibilidade, em que quanto mais próximo de zero mais significância o parâmetro possui. A Figura 14 mostra os resultados da sensibilidade dos parâmetros para a bacia do Rio Taperoá nos dois períodos de análise utilizando a função *p-value*.

Figura 14 – Resultados da sensibilidade dos parâmetros utilizando a função *p-value*, para: (a) 1º período e (b) 2º período



Fonte: Autor (2016).

Nota-se que houve uma mudança na sensibilidade dos parâmetros no 2º período em relação ao 1º período em análise. No 1º os parâmetros que apresentaram maior grau de sensibilidade estão relacionados à umidade do solo (Cn2), presença da água no solo (Gw_revap, Alpha_bf, Sol_awc, Gw_qmn, Sol_K e Rchrg_dp), propriedades do solo (Sol_Z) e evaporação da água no solo (Esco). Já no 2º período os parâmetros que se mostraram mais sensíveis foram aqueles relacionados também à presença de água no solo (Gw_qmn, Gw_revap, Gw_delay e Sol_awc), umidade do solo (Cn2), evaporação da água no solo (Esco), influência da vegetação para o escoamento (Canmx), movimento da água no canal fluvial (Ch_K2) e declividade (Slsubbsn).

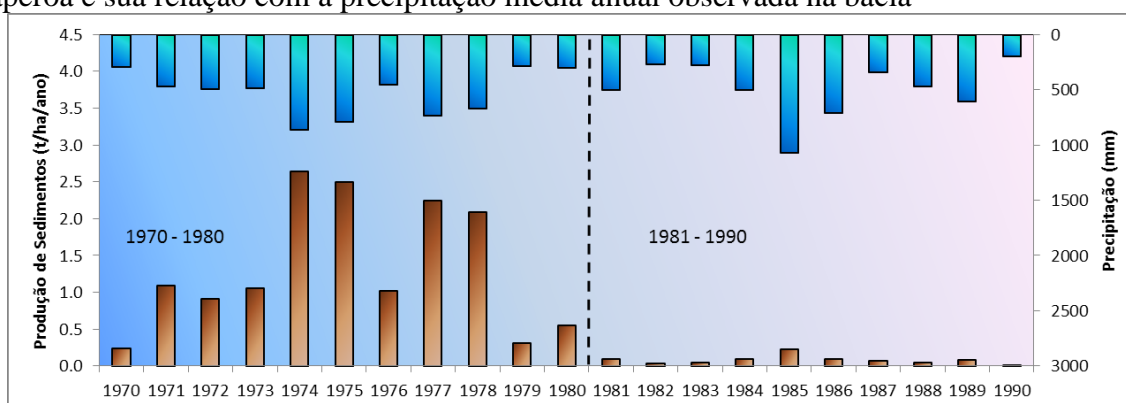
Assim, vê-se que estes parâmetros possuem influência direta no comportamento do escoamento superficial, uma vez que estão ligados à dinâmica da água na superfície, sendo parte desta interceptada pela vegetação e evaporada, outra parte infiltrada até que se chegue ao ponto de saturação do solo e a outra escoada no terreno, provocando também a produção de sedimentos.

Ressalta-se que a sensibilidade destes parâmetros está relacionada às condições ambientais da bacia do Rio Taperoá ao longo de toda a série temporal estudada (1970 a 1990). Se ocorrerem mudanças em qualquer um dos elementos que compõem a bacia (uso do solo, precipitação, declividade, tipos de solo, etc.) o modelo irá apresentar resultados diferentes para a sensibilidade dos parâmetros usados na modelagem.

5.3 Análise da simulação da produção de sedimentos

A estimativa da produção de sedimentos na bacia do Rio Taperoá também foi realizada levando em consideração os dois períodos em análise, a fim de verificar as mudanças deste processo que ocorreram ao longo do tempo na bacia. A Figura 15 mostra o comportamento da produção de sedimentos e da precipitação na bacia nos dois períodos analisados .

Figura 15 – Comportamento da produção de sedimentos anual estimada na bacia do Rio Taperoá e sua relação com a precipitação média anual observada na bacia



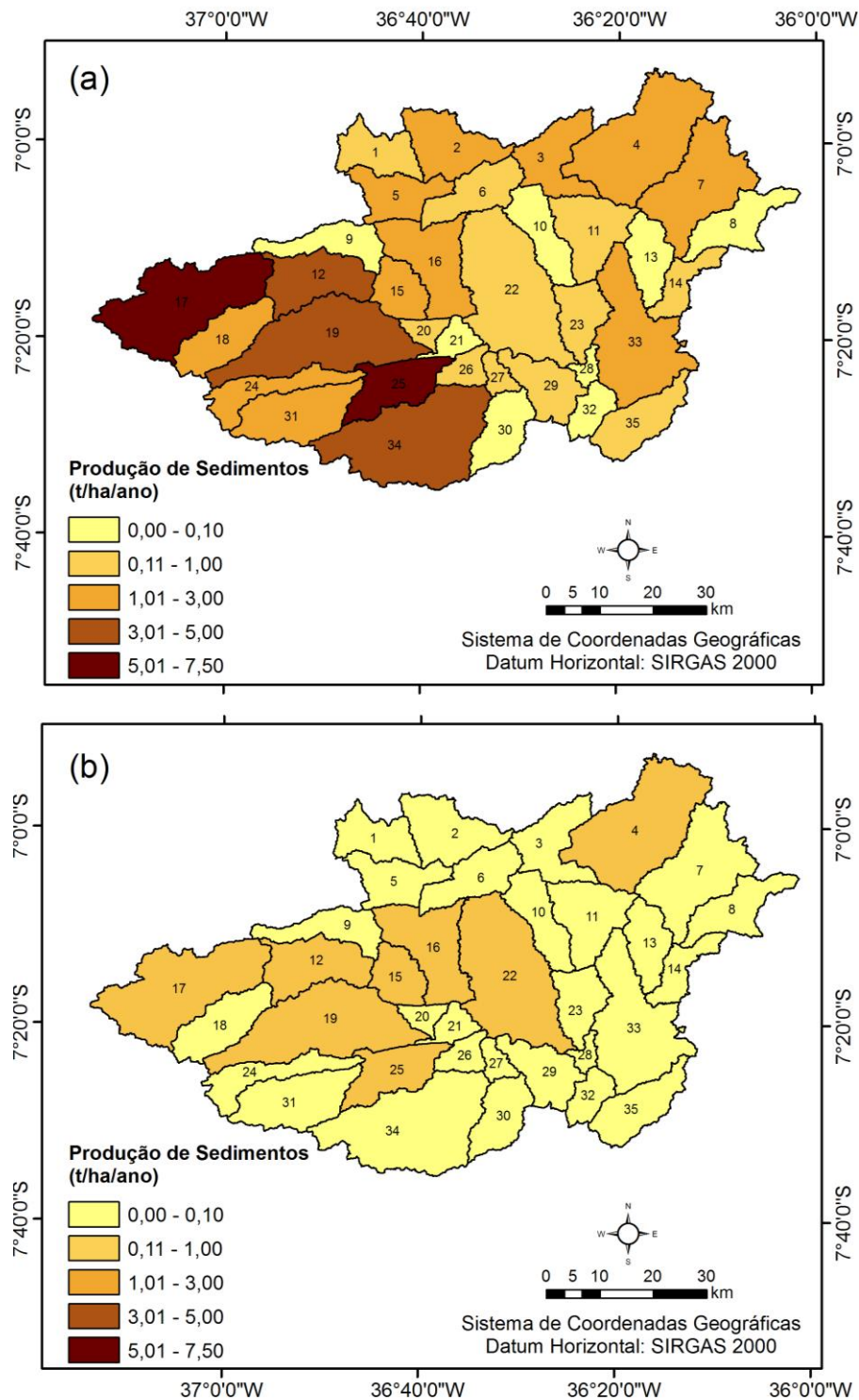
Fonte: Autor (2016).

Assim como no caso da vazão, a produção de sedimentos também apresentou uma tendência na diminuição de suas taxas no 2º período quando comparado com o 1º. Enquanto que no 1º período, a produção de sedimentos média na bacia foi estimada em 1,33 t/ha/ano, o 2º período apresentou uma estimativa de 0,08 t/ha/ano, uma diminuição de 94% ao longo da série temporal. Esta diminuição drástica da produção de sedimentos está relacionada também ao decréscimo nas taxas de vazão, bem como a possível construção de reservatórios e outros barramentos ao longo dos rios durante os anos do 2º período.

Ainda assim, é possível observar uma estreita relação entre o comportamento da precipitação e da produção de sedimentos ao longo da série. Notou-se que os anos que registraram os maiores valores de chuva em cada período também possuem os maiores valores de produção de sedimentos, como, por exemplo, nos anos de 1974, 1975, 1977, 1978 e 1985.

Em escala espacial, a bacia do Rio Taperoá também demonstrou diferenças significativas em se tratando da diminuição da produção de sedimentos comparando os dois períodos analisados (Figura 16). Percebeu-se que as sub-bacias 7, 12, 15, 17, 19, 25 e 34 apresentaram diminuição significativa nas taxas de produção de sedimentos no 2º período em relação ao período anterior. Observa-se que entre 1981 e 1990 nenhuma sub-bacia possuiu taxa de produção de sedimentos acima de 1,00 t/ha/ano.

Figura 16 – Distribuição espacial da produção de sedimentos nas sub-bacias do Rio Taperoá, para: (a) 1º período e (b) 2º período



Fonte: Autor (2016).

As sub-bacias 17 e 25 foram as principais produtoras de sedimentos na bacia entre 1970 e 1980. Isso se deve, principalmente, a presença de declividades elevadas em ambas as

sub-bacias, sobretudo na sub-bacia 17. Os tipos de solos existentes nestas sub-bacias também influenciam diretamente na produção de sedimentos, sendo que na sub-bacia 17 há a predominância do Neossolo Litólico, e na sub-bacia 25 existe a predominância do Luvisolo. Estes tipos de solo favorecem a produção de sedimentos por possuírem uma textura arenosa em seu horizonte superficial (vide a textura dos solos utilizados na modelagem no Apêndice A). Ambos os solos facilitam a desagregação de suas partículas por não apresentarem um nível de consolidação capaz de dificultar a ação da erosão (BERTONI e LOMBARDI NETO, 2010; GUERRA et al., 2008).

Dantas et al. (2015), analisando a produção de sedimentos para a bacia do Rio Taperoá entre 1973 e 1990, estimaram uma média de 2,5 t/ha/ano para todo o período estudado. Os autores apontaram que a porção sudeste da bacia apresenta as maiores taxas de produção de sedimentos. A porção sudeste da bacia do Rio Taperoá indicada pelos autores como sendo a que mais se destaca pela produção de sedimentos corresponde às sub-bacias 25, 31 e 34, sendo que a sub-bacia 25 é a maior produtora de sedimentos no 1º período, com 7,5 t/ha/ano. No 2º período a sub-bacia 12 aparece como a principal produtora de sedimentos, com 0,68 t/ha/ano.

Em ambos os períodos, as sub-bacias 8, 9 e 10 foram as menores produtoras de sedimentos da bacia. As baixas taxas de produção de sedimentos nessas sub-bacias estão relacionadas à pouca presença de declividades acentuadas, visto que não há predominância de tipos de solo e classes de uso do solo que favoreçam o desenvolvimento dos processos de erosão nessas áreas.

5.4 Práticas de conservação do solo na bacia do Rio Taperoá

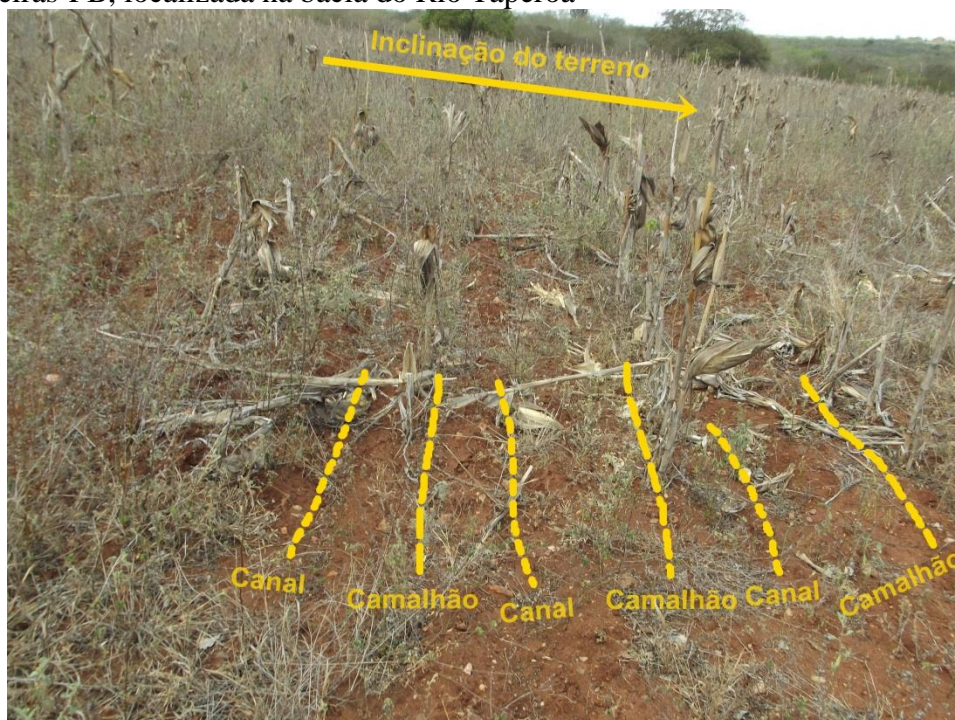
Como mencionado anteriormente, a visita de campo permitiu, além da observação *in loco* dos elementos paisagísticos, a identificação de medidas que visam a conservação do solo na bacia do Rio Taperoá. Ressalta-se que não foram possíveis várias visitas às propriedades devido à logística da execução do trabalho de campo. No entanto, foi identificado um tipo de prática conservacionista na área rural do município de Cabaceiras-PB, mais precisamente no Assentamento Serra do Monte, localizado entre as coordenadas 36°8'44"W, 36°14'13"W e 7°21'3"S, 7°25'3"S. Neste local visitou-se o lote do assentado Anchieta Pereira, onde foi possível verificar uma prática de caráter mecânico utilizado para conservação do solo (Figura 17).

Observou-se um plantio em curvas de nível feito no sentido paralelo à inclinação do terreno, com o intuito de promover a diminuição da velocidade do escoamento superficial e, ao mesmo tempo, aumentar a infiltração de água no solo através da intercalação de canais e camalhões. Também pode-se perceber a presença de vegetação herbácea na maior parte do terreno, o que impede o impacto direto das gotas de chuva no solo, contribuindo para a conservação da sua estrutura física.

Santos et al. (2007) mediram a perda de solo em parcelas de erosão sob diferentes tipos de cobertura superficial em duas bacias experimentais na região do Cariri Paraibano: Sumé e São João do Cariri. Os autores verificaram, na bacia experimental de Sumé, que na parcela com vegetação nativa a erosão foi significativamente menor do que na parcela com solo revolvido, registrando valores anuais médios de 0,2 t/ha e 25,3 t/ha, respectivamente. Para a bacia experimental de São João do Cariri verifica-se o mesmo comportamento da erosão em relação à cobertura superficial: na parcela mantida um período com vegetação rasteira e em outro período desmatada a erosão foi menor do que na parcela completamente desmatada, registrando valores médios de 1,0 t/ha e 4,2 t/ha, respectivamente.

Os resultados encontrados por Santos et al. (2007) corroboram com a discussão de que a vegetação de Caatinga possui influência direta no processo de produção de sedimentos, uma vez que recobre a superfície do terreno e protege o solo contra o impacto das gotas de chuva, além de diminuir a velocidade da enxurrada nos eventos de precipitação.

Figura 17 – Exemplo de plantio em curvas de nível em uma propriedade rural no município de Cabaceiras-PB, localizada na bacia do Rio Taperoá



Fonte: Autor (2014).

Além das práticas identificadas neste caso, também podem ser utilizadas práticas de caráter edáfico ou vegetativo com objetivo de fornecer matéria orgânica ao solo, para melhorar sua fertilidade e sua estrutura física (LEPSCH, 2010). Assim, podem ser adicionados ao solo galhos ou folhas provenientes da vegetação nativa, bem como esterco e fezes de animais criados na propriedade rural. A utilização de compostagem também pode contribuir com o fornecimento de húmus e nutrientes ao solo, o que potencializa o crescimento das plantas.

A realização de queimadas de matéria orgânica provenientes de galhos de árvores da vegetação local (algaroba, jurema, mandacaru, entre outras), ou de árvores de pequeno porte, também é uma técnica bastante utilizada na região do Cariri Paraibano. Na região esta técnica é chamada popularmente de coivara, onde a vegetação é queimada para que a aceleração da decomposição da matéria orgânica favoreça o plantio de culturas tradicionais cultivadas na região. O que se ressalta é que esta técnica não deve ser empregada com frequência, pois a sua recorrente utilização pode danificar as propriedades do solo, pondo em risco sua fertilidade.

Estas práticas de conservação do solo, utilizadas de maneira correta, podem promover a diminuição da produção de sedimentos nas áreas da bacia do Rio Taperoá onde este processo ocorre com maior intensidade, pois além de proporcionarem o aumento da cobertura superficial exercida pela vegetação também são responsáveis pelo melhoramento das

propriedades do solo, ações que dificultam o desenvolvimento dos processos erosivos em áreas favoráveis para a ocorrência da erosão do solo.

Ressalta-se, novamente, a importância de práticas que estejam relacionadas à cobertura superficial do terreno; entendendo que estas medidas contribuam para a proteção do solo contra a erosividade das chuvas e diminuam as taxas de perda de solo, pois a maior parte dos solos da bacia (assim como na maior parte do semiárido) são pouco desenvolvidos (decorrente do substrato rochoso cristalino e dos baixos totais pluviométricos) e a perda de material pedogenético ao longo do tempo pode levá-lo a sua inutilização.

Deve-se pensar em medidas que mostrem ser possível amenizar os efeitos nocivos causados pela ação da erosão no solo a um baixo custo que permita ao agricultor a aplicação de técnicas promissoras de manejo do solo, sobretudo àquelas famílias que dependem essencialmente da produção agrícola.

As práticas conservacionistas podem ser um caminho para a utilização da terra sob uma perspectiva de proteção à qualidade do solo, mesmo para aqueles pequenos agricultores que não possuem condições financeiras de investimento em técnicas sofisticadas de manejo, dando a oportunidade para que eles produzam sem causar grandes prejuízos ao ambiente.

6 CONSIDERAÇÕES FINAIS

Com base no que foi apresentado é possível perceber parte da dinâmica hidrossedimentológica existente na bacia do Rio Taperoá através dos resultados encontrados na pesquisa. Também nota-se a complexidade do ponto de vista ambiental que a bacia apresenta pela relação entre os elementos que a compõem, tanto naturais quanto antrópicos.

A respeito da análise das modificações do uso do solo na bacia levando em consideração os dois períodos (1970-1980 e 1981-1990) observou-se um aumento significativo nas áreas de Vegetação Arbórea/Arbustiva (15%) e, ao mesmo tempo, uma diminuição drástica das áreas de Vegetação Arbustiva (-21%). No entanto, salienta-se que estes resultados podem ter sido influenciados pelas características das imagens de satélite utilizadas na classificação do uso do solo, a exemplo da resolução entre os sensores e da data do registro da imagem.

No caso da vazão, também identificou-se uma variação significativa em comparação aos dois períodos analisados. No 1º período a vazão média registrada no posto fluviométrico era de $6,56 \text{ m}^3/\text{s}$ e no 2º período passa a ser de $3,48 \text{ m}^3/\text{s}$, ou seja, uma diminuição de 53%. O modelo SWAT também seguiu essa tendência e estimou uma vazão média observada para o 1º período igual a $8,39 \text{ m}^3/\text{s}$ e para o 2º período, $3,67 \text{ m}^3/\text{s}$. Contudo, o SWAT apresentou um ajuste muito bom para o 1º período ($\text{COE} = 0,81$ e $R^2 = 0,83$) e bom para o 2º período ($\text{COE} = 0,70$ e $R^2 = 0,70$). Também foi visto que em escala espacial algumas sub-bacias passaram a apresentar menores valores de vazão no 2º período em relação ao 1º período, sendo que as sub-bacias que compreendem o curso do rio principal, o Rio Taperoá, demonstram as maiores taxas de vazão na bacia em ambos os períodos analisados.

Em relação à produção de sedimentos na bacia, verifica-se a mesma tendência ocorrida na vazão: diminuição das taxas no 2º período em relação ao 1º período. Entre 1970 e 1980 o SWAT estimou uma produção de sedimentos média de $1,33 \text{ t/ha/ano}$, sendo que entre 1981 e 1990 este valor cai para $0,08 \text{ t/ha/ano}$, uma diminuição de 94% de um período para o outro. Espacialmente também se identificaram modificações notáveis na produção de sedimentos, com uma diminuição significativa do número de sub-bacias que passaram a apresentar menores valores no 2º período em relação ao 1º período. Viu-se, ainda, que as maiores taxas de produção de sedimentos estão associadas às características de declividade e tipos de solo das sub-bacias que possuem os maiores valores na bacia.

Para tentar amenizar os impactos causados pelos processos erosivos discutiu-se a adoção de práticas conservacionistas no manejo do solo na bacia. Estas práticas, sim, podem

ser aplicadas nas propriedades rurais daquelas famílias que não possuem capital suficiente para adquirir ferramentas e apoio técnico que lhes auxiliem na busca por uma produção que não seja prejudicada pela ação da erosão. É nesse momento que a realização de projetos de extensão envolvendo instituições públicas de ensino (escolas ou universidades), órgãos estatais e organizações sociais coletivas se apresentam como importantíssimos meios de disseminar o conhecimento junto às comunidades que necessitam de ajuda para a resolução de problemas cotidianos.

Destaca-se, por fim, a contribuição que a Geografia pode promover na realização de pesquisas relacionadas a esta temática, principalmente pela capacidade de articular diferentes áreas do conhecimento com o objetivo de fazer uma análise completa e interdisciplinar da realidade ao qual se está investigando. Ressalta-se, ainda, a importância da utilização dos SIG para a obtenção de resultados mais precisos e claros, ao mesmo tempo, o que auxilia de maneira fundamental as medidas de planejamento e gestão ambientais.

7 REFERÊNCIAS

- ABBASPOUR, K. C.; JOHNSON, A.; VAN GENUCHTEN, M. Th. Estimating uncertain flow and transport parameters using a sequential uncertainty fitting procedure. **Vadose Zone Journal**, v. 3, n. 4, 2004, p. 1340-1352.
- ABBASPOUR, K. C.; YANG, J.; MXIMOV, I.; SIBER, R.; BOGNER, K.; MIELEITNER, J.; ZOBRIST, J.; SRINIVASAN, R. Modelling hydrology and water quality in the pre-alpine/alpine Thur watershed using SWAT. **Journal of Hydrology**, v. 333, 2007, p. 413-430.
- AESA. Agência Executiva e de Gestão das Águas do Estado da Paraíba. **Plano Estadual de Recursos Hídricos do estado da Paraíba**. 2015. Disponível em: <<http://www.aesa.pb.gov.br/perh/>>. Acesso em: 17 de jun. 2015.
- AMORIM, R. S. S.; SILVA, D. D.; PRUSKI, F. F.; MATOS, A. T. Avaliação do desempenho dos modelos de predição da erosão hídrica USLE, RUSLE e WEPP para diferentes condições edafoclimáticas do Brasil. **Engenharia Agrícola**, Jaboticabal, v. 30, n. 6, p. 1046-1059, 2010.
- ANA. Agência Nacional de Águas. **Sistema Nacional de Informações sobre Recursos Hídricos**. 2015. Disponível em: <<http://www.snirh.gov.br/>>. Acesso em: 07 de mai. 2015.
- ARNOLD, J. G.; SRINIVASAN, R.; MUTTIAH, R. S.; WILLIAMS, J. Large area hydrologic modeling and assessment: Part I - model development. **Journal of American Water Resources Association**, Middleburg, v. 34, n. 1, 1998, p. 73-90.
- BERTONI, J.; LOMBARDI NETO, F. **Conservação do solo**. 7. ed. São Paulo: Ícone, 2010, 355 p.
- BORDAS, M. P.; SEMMELMANN, F. R. Elementos de engenharia de sedimentos. In: TUCCI, C. E. M. **Hidrologia: ciência e aplicação**. 2. ed. Porto Alegre: Editora Universitária da UFRGS/ABRH, 2001, p. 915-943.
- BRESSIANI, D. A.; SRINIVASAN, R.; JONES, C. A.; MENDIONDO, E. M. Effects of different spatial and temporal weather data resolutions on the streamflow modeling of a semi-arid basin, Northeast Brazil. **International Journal of Agricultural & Biological Engineering**, St. Joseph, v. 8, n. 3, 2015, p. 1-16.
- CARVALHO, M. G. R. F. **Classificação Geomorfológica do Estado da Paraíba**. 1. ed. João Pessoa: Editora Universitária da UFPB, 1982, 72 p.
- CARVALHO, N. O. **Hidrossedimentologia Prática**. 2. ed. Rio de Janeiro: Interciência, 2008, 599 p.
- CARVALHO NETO, J. G. **Simulação Hidrossedimentológica da Bacia do Riacho dos Namorados Com o Modelo SWAT**. 2011. 201 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil e Ambiental) - Universidade Federal de Campina Grande, Campina Grande - PB.
- CHRISTOFOLETTI, A. **Modelagem de sistemas ambientais**. 1. ed. São Paulo: Blucher, 1999, 236 p.

DANTAS, J. C.; SILVA, M. A.; SILVA, R. M.; VIANNA, P. C. G. Simulação vazão-erosão usando o modelo SWAT para uma grande bacia da região semiárida da Paraíba. **Geociências**, Rio Claro, v. 34, n. 4, p. 816-827, 2015.

DOMINGOS, J. L. **Estimativa de perda de solo por erosão hídrica em uma bacia hidrográfica**. 2006. 66 f. Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação em Geografia) - Universidade Federal do Espírito Santo, Vitória - ES.

EMBRAPA. Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária - Serviço Nacional de Levantamento e Conservação de Solos. **Súmula da X reunião Técnica de Levantamento de Solos**. Miscelânea 1, Rio de Janeiro: 1979, 83 p.

EMBRAPA. Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária. **Sistema Brasileiro de Classificação de Solos**. 2. ed. Rio de Janeiro: EMBRAPA, 2006, 306 p.

EMBRAPA. Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária. **Sistema de Informação de Solos Brasileiros**. 2015. Disponível em: <<http://www.sisolos.cnptia.embrapa.br/>>. Acesso em: 25 de jun. 2015.

GASSMAN, P. W.; REYES, M. R.; GREEN, C. H.; ARNOLD, J. G. The soil and water assessment tool: historical development, applications, and future research directions. **Transactions of the American Society of Agricultural & Biological Engineers**, St. Joseph, v. 50, n. 4, 2007, p. 1211-1250.

GELER ROFFE, T. **Dinâmica da produção de sedimentos devido a mudança no uso da terra: estudo de caso da bacia de Chambas, Província Ciego de Ávila, Cuba**. 2012. 365 f. Tese (Doutorado em Geociências) - Universidade Estadual de Campinas, Campinas - SP.

GUERRA, A. J. T.; SILVA, A. S.; BOTELHO, R. G. M. **Erosão e Conservação dos Solos: Conceitos, Temas e Aplicações**. 3. ed. Rio de Janeiro: Bertrand Brasil, 2008, 339 p.

IBGE. Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística. **Censo Demográfico**. 2010. Disponível em: <<http://www.censo2010.ibge.gov.br/>>. Acesso em: 10 jan. 2016.

INMET. Instituto Nacional de Meteorologia. **Banco de Dados Meteorológicos para Ensino e Pesquisa**. 2015. Disponível em: <<http://www.inmet.gov.br/portal/index.php?r=bdmep/bdmep>>. Acesso em: 07 de mai. 2015.

INPE. Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais. **Banco de Dados Geomorfométricos do Brasil (TOPODATA)**. 2015a. Disponível em: <<http://www.dsr.inpe.br/topodata/>>. Acesso em: 15 de jun. 2015.

INPE. Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais. **Catálogo de Imagens da Divisão de Geração de Imagens**. 2015b. Disponível em: <<http://www.dgi.inpe.br/CDSR/>>. Acesso em: 15 de jun. 2015.

KNISEL, W. G. CREAMS: a field scale model for chemicals, runoff and erosion for agricultural management systems. **Conservation Research Report**, Whashington D.C., n. 26, 1980, 643 p.

LANE, L.; NEARING, M.; LAFLEN, J.; FOSTER, G.; NICHOLS, M. Description of the US Department of Agriculture Water Erosion Prediction Project (WEPP) Model, In: PARSONS, A. J.; ABRAHAM, A. D. **Overland Flow: Hydraulics and Erosion Mechanics**. London: UCL Press, 1992, p. 377-391.

LEONARD, R. A.; KNISEL, W. G.; STILL, D. A. GLEAMS: Groundwater loading effects on agricultural management systems. **Transactions of the American Society of Agricultural & Biological Engineers**, St. Joseph, v. 30, n. 5, 1987, p. 1403-1418.

LEPSCH, I. F. **Formação e conservação dos solos**. 2. ed. São Paulo: Oficina de Textos, 2010, 216 p.

LIMA, R. P.; ROLIM, M. M.; DANTAS, M. S. M.; COSTA, A. R. F. C.; DUARTE, A. S.; SILVA, A. R. Atributos químicos de um Neossolo Regolítico distrófico em função das doses e tempos de aplicação de vinhaça. **Revista Agro@mbiente On-line**, Boa Vista, v. 7, n. 3, p. 261-268, 2013.

MACHADO, P. L. O. A.; BERNARDI, A. C. C.; VALENCIA, L. I. O.; MOLIN, J. P.; GIMENEZ, L. M.; SILVA, C. A.; ANDRADE, A. G.; MEDARI, B. E.; MEIRELLES, M. S. P. Mapeamento da condutividade elétrica e relação com a argila de Latossolo sob plantio direto. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, Brasília, v. 41, n. 6, p. 1023-1031, 2006.

MARCHIORO, E. **Modelagem hidrossedimentológica na bacia do córrego Santa Maria: Subsídios à Aplicação de Práticas de Conservação de Água e Solo no Noroeste Fluminense**. 2008. 189 f. Tese (Doutorado em Geografia) - Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro - RJ.

MENDES, C. A. B.; CIRILO, J. A. **Geoprocessamento em Recursos Hídricos: Princípios, integração e aplicação**. 2. ed. Porto Alegre: ABRH, 2013, 576 p.

MOREIRA, E.; TARGINO, I. Espaço, capital e trabalho no campo paraibano. **Revista da ANPEGE**, v. 7, n. 1, p. 147-160, 2011.

MORIASI, D. N.; ARNOLD, J. G.; VAN LIEW, M. W.; BINGER, R. L.; HARMEL, R. D.; VEITH, T. Model evaluation guidelines for systematic quantification of accuracy in watershed simulations. **Transactions of the American Society of Agricultural & Biological Engineers**, St. Joseph, v. 50, n. 3, 2007, p. 885-900.

MORO, M. **A utilização da interface SWAT-SIG no estudo da produção de sedimentos e do volume de escoamento superficial com simulação de cenários alternativos**. 2005. 100 f. Dissertação (Mestrado em Agronomia) - Universidade de São Paulo, Piracicaba - SP.

NASCIMENTO, S. S.; ALVES, J. J. A. Ecoclimatologia do cariri paraibano. **Revista Geográfica Acadêmica**, Boa Vista, v. 2, n. 3, p. 28-41, 2008.

NASH, J. E.; SUTCLIFFE, J. V. River flow forecasting through conceptual models I: a discussion of principles. **Journal of Hydrology**, v. 10, n.1, 1970, p. 282-290.

NEITSCH, S. L.; ARNOLD, J. G.; KINIRY, J. R.; WILLIAMS, J. R. **Soil and Water Assessment Tool: Theoretical documentation - version 2009**. Temple: Texas A&M University, 2011, 618 p.

NRCS. Natural Resources Conservation Service. Chapter 7: Hydrologic Soil Groups. In: NRCS. Natural Resources Conservation Service. **National Engineering Handbooks Hydrology Chapters (Part 630)**. Washington, DC: USDA, 2009, p. 1-5.

PAES, J. L. A.; RUIZ, H. A.; FERNANDES, R. B. A.; FREIRE, M. B. G. S.; BARROS, M. F. C.; ROCHA, G. C. Dispersão de argilas em solos afetados por sais. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, Campina Grande, v. 17, n. 11, p. 1135-1142, 2013.

RAWLS, W. J.; BRAKENSIEK, D. L.; SAXTON, K. E. Estimation of Soil Water Properties. **Transactions of the American Society of Agricultural Engineers**, St. Joseph, v. 25, n. 5, 1982, p. 1316-1328.

SALTER, P. J.; WILLIAMS, J. B. The influence of texture on the moisture characteristics of soils. IV: A method of estimating the available-water capacities of profiles in the field. **Journal of Soil Science**, v. 18, n. 1, 1967, p. 174-181.

SALTER, P. J.; WILLIAMS, J. B. The influence of texture on the moisture characteristics of soils. V: Relationships between particle-size composition and moisture contents at the upper and lower limits of available-water. **Journal of Soil Science**, v. 20, n. 1, 1969, p. 126-131.

SANTOS, C. A. G.; SILVA, R. M.; SRINIVASAN, V. S. Análise das perdas de água e solo em diferentes coberturas superficiais no semiárido da Paraíba. **Okara**, João Pessoa, v. 1, n. 1, 2007, p. 16-32.

SANTOS, J. Y. G. **Análise espaço-temporal de processos hidrossedimentológicos na bacia do Rio Tapacurá (Pernambuco, Brasil)**. 2015. 148 f. Tese (Doutorado em Engenharia Civil) - Universidade Federal de Pernambuco, Recife - PE.

SAXTON, K. E.; RAWLS, W. J. Soil Water Characteristic Estimates by Texture and Organic Matter for Hydrologic Solutions. **Soil Science Society of America Journal**, Madison, v. 70, 2006, p. 1569-1578.

SCHULTZ, G. B.; SOUZA, R. M.; SANTOS, I. Simulação da produção e transporte de sedimentos na bacia do Altíssimo Rio Negro com o modelo SWAT. In: IX Encontro Nacional de Engenharia de Sedimentos. 1., 2010, Brasília. **Anais...** Brasília: ABRH, 2010. p. 1-9.

SILVA, A. M.; SCHULZ, H. E.; CAMARGO, P. B. **Erosão e hidrossedimentologia em bacias hidrográficas**. 1. ed. São Carlos: RiMa, 2003, 140 p.

SILVA, R. M. **Análise da perda de solos na Bacia do Rio Tapacurá mediante previsão climática e modelos de erosão**. 2010. 133 f. Tese (Doutorado em Engenharia Civil) - Universidade Federal de Pernambuco, Recife - PE.

SILVA, R. M.; SILVA, L. P.; MONTENEGRO, S. M. G. L.; SANTOS, C. A. G. Análise da variabilidade espaço-temporal e identificação do padrão de precipitação na Bacia do Rio Tapacurá, Pernambuco. **Sociedade & Natureza**, Uberlândia, v. 22, n. 2, p. 357-372, 2010.

SILVA, V. A.; MOREAU, M. S.; MOREAU, A. M. S. S.; REGO, N. A. C. Uso da terra e perda de solo na Bacia Hidrográfica do Rio Colônia, Bahia. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, Campina Grande, v. 15, n. 3, p. 310-315, 2011.

SILVA, M. A.; DANTAS, J. C.; SILVA, R. M. Simulação da vazão e produção de sedimentos usando o modelo SWAT para a bacia do Rio Taperoá-PB. In: XI Encontro Nacional de Engenharia de Sedimentos. 1. 2014, João Pessoa. **Anais...** João Pessoa: ABRH, 2014, p. 1-15.

SILVA, M. L. N.; PORTELA, J. C.; SOBRINHO, F. E.; CAVALCANTE, J. S. J.; REBOUÇAS, C. A. M.; DIAS, N. S. Topossequência de Neossolos na zona rural de Florânia, Rio Grande do Norte. **Revista Agropecuária Científica no Semiárido**, Patos, v. 10, n. 1, p. 22-32, 2014.

SRINIVASAN, V. S.; PAIVA, F. M. L. Regional validity of the parameters of a distributed runoff-erosion model in the semi-arid region of Brazil. **Science in China Series E: Technological Sciences**, v. 52, n. 11, 2009, p. 3348-3356.

SOUZA, B. I. **Cariri Paraibano: do silêncio do lugar à desertificação**. 2008. 198 f. Tese (Doutorado em Geografia) - Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre - RS.

SOUZA, B. I.; SUERTEGARAY, D. M. A.; LIMA, E. R. V. Desertificação e seus efeitos na vegetação e solos do Cariri Paraibano. **Mercator**, Fortaleza, v. 8, n. 16, p. 217-232, 2009.

TESCH, F. **Avaliação da calibração do modelo Soil and Water Assessment Tool para a simulação de estradas não pavimentadas em bacias hidrográficas**. 2015. 120 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Ambiental) - Universidade Federal do Espírito Santo, Vitória - ES.

TRAVASSOS, I. S. **“Florestas brancas” do semiárido nordestino: desmatamento e desertificação no cariri paraibano**. 2012. 148 f. Dissertação (Mestrado em Geografia) - Universidade Federal da Paraíba, João Pessoa - PB.

TSVETSINSKAYA, E. A.; SCHAAF, C. B.; GAO, F.; STRAHLER, A. H.; DICKINSON, R. E.; ZENG, X.; LUCHT, W. Relating MODIS-derived surface albedo to soils and rock types over Northern Africa and the Arabian peninsula. **Geophysical Research Letters**, v. 29, n. 9, 2002, p. 67-1-67-4.

TUCCI, C. E. M. **Modelos Hidrológicos**. 2. ed. Porto Alegre: Editora Universitária da UFRGS, 2005, 678 p.

VITAL, S. R. O.; SILVEIRA, T. A.; ALENCAR, H. M. Q.; FERREIRA, B. Uso de imagem SRTM (Shuttle Radar Topography Mission) para o mapeamento geomorfológico na microbacia do Açude Taperoá II, Paraíba, Brasil. In: III Simpósio Brasileiro de Ciências Geodésicas e Tecnologias da Geoinformação. 1. 2010, Recife. **Anais...** Recife: PPCGTG, 2010, p. 1-5.

WISCHMEIER, W. H.; SMITH, D. D. **Agriculture Handbook No. 282: Predicting rainfall-erosion losses from cropland east of the Rocky Mountains**. Washington D.C.: USDA, 1965, p. 1-58.

WILLIAMS, J. R. Sediment-yield prediction with universal equation using runoff energy factor, In: **Present and Prospective Technology for Predicting Sediment Yield and Sources**. Washington D.C.: USDA, 1975, p. 244-252.

WILLIAMS, J. R.; JONES, C. A.; DYKE, P.T. A modeling approach to determining the relationship between erosion and soil productivity. **Transactions of the American Society of Agricultural Engineers**, St. Joseph, v. 27, 1984, p. 129-144.

WILLIAMS, J. R; NICKS, A. D.; ARNOLD, J. G. Simulator for water resources in rural basins. **Journal of Hydraulic Engineering**, v. 111, n. 6, 1985, p. 970-986.

WOOLHISER, D. A., SMITH, R. E.; GOODRICH, D. C. **KINEROS, a Kinematic Runoff and Erosion Model: Documentation and User Manual**. Washington D.C.: USDA, 1990, 130 p.

APÊNDICES

Apêndice A: Valores dos parâmetros para os tipos de solo usados na modelagem

| SNAM | CAM* | LAT | LUV | NEO_F | NEO_L | NEO_R | PLA | VER |
|------------|---------|---------|---------|---------|---------|---------|---------|---------|
| NLAYERS | 5 | 5 | 5 | 9 | 2 | 3 | 3 | 4 |
| HYDGRP | B | C | B | B | B | A | B | C |
| SOL_ZMX | 1550 | 2000 | 850 | 1550 | 500 | 1500 | 700 | 900 |
| ANION_EXCL | 0,453 | 0,430 | 0,464 | 0,453 | 0,437 | 0,437 | 0,453 | 0,398 |
| SOL_CRK | 0,5 | 0,5 | 0,5 | 0,5 | 0,5 | 0,5 | 0,5 | 0,5 |
| SOL_Z1 | 15 | 11 | 140 | 50 | 250 | 80 | 170 | 40 |
| SOL_BD1 | 1,63 | 1,61 | 1,54 | 1,59 | 1,59 | 1,69 | 1,61 | 1,59 |
| SOL_AWC1 | 0,175 | 0,150 | 0,183 | 0,158 | 0,158 | 0,15 | 0,175 | 0,150 |
| SOL_K1 | 25,9 | 4,3 | 2,3 | 61,1 | 61,1 | 210 | 25,9 | 4,3 |
| SOL_CBN1 | 6,6 | 7,4 | 23,3 | 2 | 4,7 | 9,3 | 7,2 | 15,3 |
| CLAY1 | 16 | 29 | 33 | 6 | 5 | 2 | 9 | 28 |
| SILT1 | 18 | 6 | 26 | 12 | 15 | 13 | 13 | 19 |
| SAND1 | 66 | 65 | 41 | 82 | 80 | 85 | 78 | 53 |
| ROCK1 | 2 | 1 | 71 | 2 | 6 | 2 | 17 | 15 |
| SOL_ALB1 | 0,227 | 0,231 | 0,196 | 0,306 | 0,302 | 0,384 | 0,346 | 0,220 |
| USLE_K1 | 0,12102 | 0,08665 | 0,11737 | 0,09554 | 0,10520 | 0,08894 | 0,10472 | 0,11412 |
| SOL_EC1 | 0,23 | 5,2 | 0,25 | 5,65 | 0,44 | 0,52 | 0,40 | 0,24 |
| SOL_Z2 | 420 | 350 | 220 | 140 | 500 | 850 | 500 | 250 |
| SOL_BD2 | 1,63 | 1,58 | 1,38 | 1,56 | 1,59 | 1,55 | 1,61 | 1,51 |
| SOL_AWC2 | 0,175 | 0,142 | 0,175 | 0,15 | 0,158 | 0,15 | 0,150 | 0,142 |
| SOL_K2 | 25,9 | 1,2 | 0,6 | 210 | 61,1 | 210 | 4,3 | 1,2 |
| SOL_CBN2 | 3,9 | 5,2 | 13,6 | 2 | 22 | 0,9 | 5,8 | 6,5 |
| CLAY2 | 16 | 34 | 52 | 6 | 6 | 2 | 26 | 40 |
| SILT2 | 20 | 7 | 14 | 2 | 14 | 12 | 13 | 14 |
| SAND2 | 64 | 59 | 34 | 92 | 80 | 86 | 61 | 46 |
| ROCK2 | 2 | 1 | 5 | 12 | 3 | 2 | 5 | 1 |
| SOL_ALB2 | 0,227 | 0,231 | 0,196 | 0,306 | 0,302 | 0,384 | 0,346 | 0,220 |
| USLE_K2 | 0,12374 | 0,08775 | 0,09428 | 0,04715 | 0,10304 | 0,10625 | 0,10693 | 0,10001 |
| SOL_EC2 | 0,23 | 5,2 | 0,25 | 5,65 | 0,44 | 0,52 | 0,40 | 0,24 |
| SOL_Z3 | 1000 | 950 | 460 | 330 | 0 | 1500 | 700 | 650 |
| SOL_BD3 | 1,63 | 1,47 | 1,35 | 1,55 | 0 | 1,55 | 1,62 | 1,51 |
| SOL_AWC3 | 0,175 | 0,142 | 0,175 | 0,183 | 0 | 0,15 | 0,150 | 0,183 |
| SOL_K3 | 25,9 | 1,2 | 0,6 | 2,3 | 0 | 210 | 4,3 | 2,3 |
| SOL_CBN3 | 2,2 | 3,9 | 9,9 | 4,6 | 0 | 0,7 | 2,3 | 5,1 |
| CLAY3 | 16 | 47 | 54 | 31 | 0 | 2 | 22 | 39 |
| SILT3 | 19 | 7 | 16 | 29 | 0 | 12 | 14 | 17 |
| SAND3 | 65 | 46 | 30 | 40 | 0 | 86 | 64 | 44 |
| ROCK3 | 2 | 2 | 8 | 0 | 0 | 2 | 1 | 2 |
| SOL_ALB3 | 0,227 | 0,231 | 0,196 | 0,306 | 0 | 0,384 | 0,346 | 0,220 |
| USLE_K3 | 0,12358 | 0,08124 | 0,09656 | 0,12072 | 0 | 0,10961 | 0,11192 | 0,10488 |
| SOL_EC3 | 0,23 | 5,2 | 0,25 | 5,65 | 0 | 0,52 | 0,40 | 0,24 |
| SOL_Z4 | 1450 | 1480 | 700 | 500 | 0 | 0 | 0 | 900 |

| | | | | | | | | |
|-----------------|---------|---------|---------|---------|---|---|---|---------|
| SOL_BD4 | 1,63 | 1,44 | 1,47 | 1,52 | 0 | 0 | 0 | 1,58 |
| SOL_AWC4 | 0,175 | 0,175 | 0,183 | 0,183 | 0 | 0 | 0 | 0,150 |
| SOL_K4 | 25,9 | 0,6 | 2,3 | 2,3 | 0 | 0 | 0 | 4,3 |
| SOL_CBN4 | 2 | 2,5 | 3,7 | 2,4 | 0 | 0 | 0 | 3,2 |
| CLAY4 | 16 | 48 | 40 | 33 | 0 | 0 | 0 | 31 |
| SILT4 | 21 | 10 | 25 | 33 | 0 | 0 | 0 | 16 |
| SAND4 | 63 | 42 | 35 | 34 | 0 | 0 | 0 | 53 |
| ROCK4 | 2 | 2 | 3 | 0 | 0 | 0 | 0 | 6 |
| SOL_ALB4 | 0,227 | 0,231 | 0,196 | 0,306 | 0 | 0 | 0 | 0,220 |
| USLE_K4 | 0,12713 | 0,08882 | 0,11282 | 0,12295 | 0 | 0 | 0 | 0,10842 |
| SOL_EC4 | 0,23 | 5,2 | 0,25 | 5,65 | 0 | 0 | 0 | 0,24 |
| SOL_Z5 | 1550 | 2000 | 850 | 850 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| SOL_BD5 | 1,63 | 1,32 | 1,61 | 1,64 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| SOL_AWC5 | 0,175 | 0,175 | 0,175 | 0,158 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| SOL_K5 | 25,9 | 0,6 | 25,9 | 61,1 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| SOL_CBN5 | 2,4 | 3,1 | 2,1 | 3,1 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| CLAY5 | 12 | 59 | 17 | 11 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| SILT5 | 27 | 8 | 23 | 8 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| SAND5 | 61 | 33 | 60 | 81 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| ROCK5 | 2 | 3 | 3 | 1 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| SOL_ALB5 | 0,227 | 0,231 | 0,196 | 0,306 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| USLE_K5 | 0,13378 | 0,07937 | 0,12251 | 0,08521 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| SOL_EC5 | 0,23 | 5,2 | 0,25 | 5,65 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| SOL_Z6 | 0 | 0 | 0 | 1050 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| SOL_BD6 | 0 | 0 | 0 | 1,61 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| SOL_AWC6 | 0 | 0 | 0 | 0,158 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| SOL_K6 | 0 | 0 | 0 | 61,1 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| SOL_CBN6 | 0 | 0 | 0 | 2 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| CLAY6 | 0 | 0 | 0 | 11 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| SILT6 | 0 | 0 | 0 | 8 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| SAND6 | 0 | 0 | 0 | 81 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| ROCK6 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| SOL_ALB6 | 0 | 0 | 0 | 0,306 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| USLE_K6 | 0 | 0 | 0 | 0,08669 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| SOL_EC6 | 0 | 0 | 0 | 5,65 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| SOL_Z7 | 0 | 0 | 0 | 1150 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| SOL_BD7 | 0 | 0 | 0 | 1,63 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| SOL_AWC7 | 0 | 0 | 0 | 0,175 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| SOL_K7 | 0 | 0 | 0 | 25,9 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| SOL_CBN7 | 0 | 0 | 0 | 1,9 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| CLAY7 | 0 | 0 | 0 | 17 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| SILT7 | 0 | 0 | 0 | 12 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| SAND7 | 0 | 0 | 0 | 71 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| ROCK7 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |

| | | | | | | | | |
|-----------------|---|---|---|---------|---|---|---|---|
| SOL_ALB7 | 0 | 0 | 0 | 0,306 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| USLE_K7 | 0 | 0 | 0 | 0,11089 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| SOL_EC7 | 0 | 0 | 0 | 5,65 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| SOL_Z8 | 0 | 0 | 0 | 1300 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| SOL_BD8 | 0 | 0 | 0 | 1,62 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| SOL_AWC8 | 0 | 0 | 0 | 0,175 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| SOL_K8 | 0 | 0 | 0 | 25,9 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| SOL_CBN8 | 0 | 0 | 0 | 1,8 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| CLAY8 | 0 | 0 | 0 | 14 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| SILT8 | 0 | 0 | 0 | 5 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| SAND8 | 0 | 0 | 0 | 81 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| ROCK8 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| SOL_ALB8 | 0 | 0 | 0 | 0,306 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| USLE_K8 | 0 | 0 | 0 | 0,07648 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| SOL_EC8 | 0 | 0 | 0 | 5,65 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| SOL_Z9 | 0 | 0 | 0 | 1550 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| SOL_BD9 | 0 | 0 | 0 | 1,67 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| SOL_AWC9 | 0 | 0 | 0 | 0,15 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| SOL_K9 | 0 | 0 | 0 | 210 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| SOL_CBN9 | 0 | 0 | 0 | 0,8 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| CLAY9 | 0 | 0 | 0 | 6 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| SILT9 | 0 | 0 | 0 | 1 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| SAND9 | 0 | 0 | 0 | 93 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| ROCK9 | 0 | 0 | 0 | 8 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| SOL_ALB9 | 0 | 0 | 0 | 0,306 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| USLE_K9 | 0 | 0 | 0 | 0,04872 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| SOL_EC9 | 0 | 0 | 0 | 5,65 | 0 | 0 | 0 | 0 |

* CAM = Cambissolo; LAT = Latossolo; LUV = Luvisolo; NEO_F = Neossolo Flúvico; NEO_L = Neossolo Litólico; NEO_R = Neossolo Regolítico; PLA = Planossolo; VER = Vertissolo.